

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 11-275826

(43)Date of publication of application : 08.10.1999

(51)Int.Cl.

H02K 16/02

H02K 21/12

(21)Application number : 10-077449

(71)Applicant : NISSAN MOTOR CO LTD

(22)Date of filing : 25.03.1998

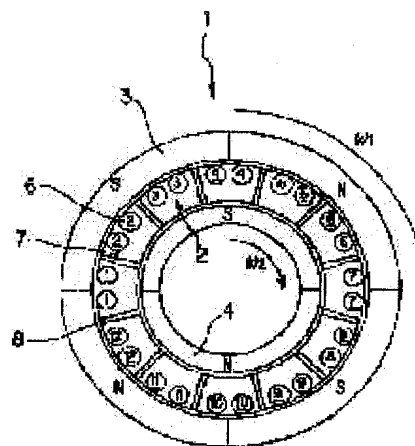
(72)Inventor : NAKANO MASAKI

## (54) ROTATING MACHINE

## (57)Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To prevent a loss caused by a stator coil current, when two rotors are provided.

**SOLUTION:** In a rotating machine having a body 1, two rotors 3, 4 and a stator 2 are structured in three layers on the same shaft. Then, a single coil 6 is formed on the stator 2 and compound currents are made to flow in this single coil 6, in such a way that the same number of revolving magnetic fields with the number of rotors 3, 4 are produced. When one of the rotor 3, 4 is operated as a motor and the other as a generator, it is sufficient merely for a current corresponding to the difference between motor driving power and generating power to be caused to flow in the single coil 6. As a result, the efficiency is improved.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2000 Japanese Patent Office

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平11-275826

(43) 公開日 平成11年(1999)10月8日

(51) Int.Cl.<sup>9</sup>

H 0 2 K 16/02  
21/12

識別記号

F I

H 0 2 K 16/02  
21/12

M

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 31 頁)

(21) 出願番号 特願平10-77449

(22) 出願日 平成10年(1998)3月25日

(71) 出願人 000003997

日産自動車株式会社

神奈川県横浜市神奈川区宝町2番地

(72) 発明者 中野 正樹

神奈川県横浜市神奈川区宝町2番地 日産  
自動車株式会社内

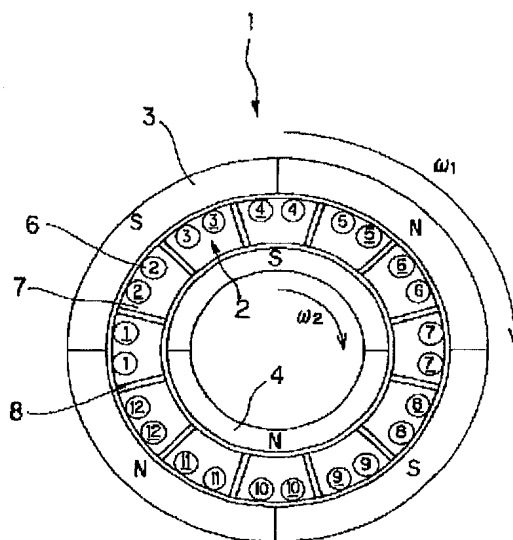
(74) 代理人 弁理士 後藤 政喜 (外1名)

(54) 【発明の名称】 回転電機

(57) 【要約】

【課題】 2つのロータを備える場合に、ステータコイル電流による損失を防止する。

【解決手段】 2つのロータ(3, 4)と1つのステータ(2)を三層構造かつ同一の軸上に構成するとともに、前記ステータ(2)に単一のコイル(6)を形成し、この単一のコイル(6)に前記ロータの数と同数の回転磁場が発生するように複合電流を流す。ロータの一方をモータとして、残りをジェネレータとして運転する場合に、モータ駆動電力と発電電力の差の分の電流を単一のコイルに流すだけでよいので、効率が大幅に向上する。



2…ステータ  
3…外側ロータ  
4…内側ロータ  
6…コイル

**【特許請求の範囲】**

【請求項1】 2つのロータと1つのステータを三層構造かつ同一の軸上に構成するとともに、前記ステータに単一のコイルを形成し、この単一のコイルに前記ロータの数と同数の回転磁場が発生するように複合電流を流すことを特徴とする回転電機。

【請求項2】 各ロータの回転位相を検出し、この検出された各回転位相に応じて前記複合電流を制御することを特徴とする請求項1に記載の回転電機。

【請求項3】 前記単一のコイルに前記複合電流を流す手段はインバータであることを特徴とする請求項2に記載の回転電機。

【請求項4】 前記ロータを永久磁石で構成することを特徴とする請求項1から3までのいずれか一つに記載の回転電機。

【請求項5】 円筒状のステータの外側と内側に所定の間隔においてロータを配置することを特徴とする請求項1から3までのいずれか一つに記載の回転電機。

【請求項6】 ステータを最も外側かまたは最も内側に配置する場合に、ステータから離れた側のロータにまでステータに近い側のロータを貫通して磁束が届くようにすることを特徴とする請求項1から3までのいずれか一つに記載の回転電機。

**【発明の詳細な説明】****【0001】**

【発明の属する技術分野】 この発明は回転電機に関する。

**【0002】**

【従来の技術】 同一定格トルクの同期モータを独立に2つ設け、それぞれを同期回転させるようにしたものが提案されている（特開平9-275673号公報参照）。

**【0003】**

【発明が解決しようとする課題】 ところで、構造をコンパクトにするため、2つのロータと1つのステータを三層構造かつ同一の軸上に構成することが考えられる（特開平8-340663号公報参照）。

【0004】 この場合、2つのロータを別々に同期回転させるため、ステータには各ロータに専用のコイルを用意するとともに、この各専用コイルに流す電流を制御するインバータ（電流制御器）を2つ備えさせなければならない。

【0005】 しかしながら、それぞれのコイル、それぞれのインバータに電流を流すのでは、電流による損失（銅損、スイッチングロス）をまぬがれない。

【0006】 そこで本発明は、コイルを共用化するため単一のコイルとし、このコイルに複数の回転磁場が発生するように複合電流を流すことにより、電流による損失を防止することを目的とする。

**【0007】**

【課題を解決するための手段】 第1の発明は、2つのロ

ータと1つのステータを三層構造かつ同一の軸上に構成するとともに、前記ステータに単一のコイルを形成し、この単一のコイルに前記ロータの数と同数の回転磁場が発生するように複合電流を流す。

【0008】 第2の発明では、第1の発明において各ロータの回転位相を検出し、この検出された各回転位相に応じて前記複合電流を制御する。

【0009】 第3の発明では、第2の発明において前記単一のコイルに前記複合電流を流す手段がインバータである。

【0010】 第4の発明では、第1から第3までのいずれか一つの発明において前記ロータを永久磁石で構成する。

【0011】 第5の発明では、第1から第3までのいずれか一つの発明において円筒状のステータの外側と内側に所定の間隔においてロータを配置する。

【0012】 第6の発明では、第1から第3までのいずれか一つの発明においてステータを最も外側かまたは最も内側に配置する場合に、ステータから離れた側のロータにまでステータに近い側のロータを貫通して磁束が届くようにする。

**【0013】**

【発明の効果】 第1、第2の各発明によれば、ロータの一方をモータとして、残りをジェネレータとして運転する場合に、モータ駆動電力と発電電力の差の分の電流を単一のコイルに流すだけでよいので、効率が大幅に向上する。

【0014】 第3の発明によれば、ロータの一方をモータとして、残りをジェネレータとして運転する場合に、モータ駆動電力と発電電力の差の分の電流を単一のコイルに流すだけでよいことから、インバータの電力スイッチングトランジスタのキャパシタンスを減らすことができ、これによってスイッチング効率が向上し、より全体効率が向上する。

【0015】 第4の発明によれば、回転体は永久磁石だけであるため、スリップリングが不要である。

【0016】 第5の発明によれば、2つのロータともステータからの距離が最短になるので、同じ電流をステータコイルに流した場合に、一方のロータがステータより遠くなる配置の場合と比べて駆動トルクが大きくなる。

【0017】 第6の発明によれば、ステータのコイルを冷やす必要がある場合に冷却が容易になる。

**【0018】**

【発明の実施の形態】 図1は回転電機本体1の断面図である。同図において、円筒状のステータ2の外側と内側に所定のギャップにおいてロータ3、4が配置され（3層構造）、外側と内側の各ロータ3、4は全体を被覆する外枠5（図3参照）に対して回転可能にかつ同軸に設けられている。

【0019】 内側ロータ4は半周をS極、もう半周をN極

とした一対の永久磁石で形成され、これに対して、外側ロータ3は内側ロータ4の一極当たり2倍の極数を持つように永久磁石極が配置される。つまり、外側ロータ3のS極、N極は各2個であり、90度毎にS極とN極が入れ替わるように構成されている。

【0020】このように各ロータ3、4の磁極を配置すると、内側ロータ4の磁石は外側ロータ3の磁石により回転力を与えられることがなく、この逆に外側ロータ3の磁石が内側ロータ4の磁石により回転力を与えられることもない。

【0021】たとえば、内側ロータ4の磁石が外側ロータ3に及ぼす影響を考えてみる。簡単のため内側ロータ4は固定して考える。まず、内側ロータ4のS極とこれに対峙する外側ロータ3の上側磁石SNとの関係において、図示の状態で仮に内側ロータ4のS極が出す磁力を受けて、外側ロータの上側磁石SNが時計方向に回転しようとしたとすると、内側ロータ4のN極とこれに対峙する外側ロータ3の下側磁石SNとの関係においては、内側ロータ4のN極により外側ロータ3の下側磁石SNが反時計方向に回転しようとする。つまり、内側ロータ4のS極が外側ロータ3の上側磁石に及ぼす磁力と内側ロータ4のN極が外側ロータ3の下側磁石に及ぼす磁力とがちょうど相殺することになり、外側ロータ3は内側ロータ4と関係なく、ステータ2との関係だけで制御可能となるわけである。このことは、後述するようにステータコイルに発生する回転磁場とロータとの間でも同じである。

【0022】ステータ2は、外側ロータ3の1磁極当たり3個のコイル6で構成され、合計12個（ $=3 \times 4$ ）のコイル6が同一の円周上に等分に配置されている。なお、7はコイルが巻回されるコアで、コイル6と同数のコア7が円周上に等分に所定の間隔（ギャップ）8をおいて配列されている。

【0023】なお、後述するように、12個のコイルは番号で区別しており、この場合に6番目のコイルという意味でコイル6が出てくる。上記のコイル6という表現と紛らわしいが、意味するところは異なっている。

【0024】これら12個のコイルには次のような複合電流 $I_1 \sim I_{12}$ を流す。

【0025】まず内側ロータ4に対する回転磁場を発生させる電流（三相交流）を流すため、 $[1, 2] = [7, 8]$ 、 $[3, 4] = [9, 10]$ 、 $[5, 6] = [11, 12]$ の3組のコイルに120度ずつ位相のずれた電流 $I_d$ 、 $I_f$ 、 $I_e$ を設定する。

【0026】ここで、番号の下に付けたアンダーラインは反対方向に電流を流すことを意味させている。たとえば、1組のコイル $[1, 2] = [7, 8]$ に電流 $I_d$ を流すとは、コイル1からコイル7に向けて $I_d$ の半分の電流を、かつコイル2からコイル8に向けて $I_d$ のもう半分の電流を流すことである。1と2、7と8が円周上でそれぞれ近い位置にあるので、この電流供給により、内側ロータ4の磁極

と同数（2極）の回転磁場を生じさせることが可能となる。

【0027】次に、外側ロータ3に対する回転磁場を発生させる電流（三相交流）を流すため、 $[1] = [4] = [7] = [10]$ 、 $[2] = [5] = [8] = [11]$ 、 $[3] = [6] = [9] = [12]$ の3組のコイルに120度ずつ位相がずれた電流 $I_a$ 、 $I_c$ 、 $I_b$ を設定する。

【0028】たとえば、1組のコイル $[1] = [4] = [7] = [10]$ に電流 $I_a$ を流すとは、コイル1からコイル4に $I_a$ の電流をかつコイル7からコイル10に向けても $I_a$ の電流を流すことである。コイル1と7、コイル4と10がそれぞれ円周上の180度ずつ離れた位置にあるため、この電流供給により、外側ロータ3の磁極と同数（4極）の回転磁場を生じさせることができる。

【0029】この結果、12個のコイルには次の各複合電流 $I_1 \sim I_{12}$ を流せばよいことになる。

$$【0030】I_1 = (1/2)I_d + I_a$$

$$I_2 = (1/2)I_d + I_c$$

$$I_3 = (1/2)I_f + I_b$$

$$I_4 = (1/2)I_f + I_a$$

$$I_5 = (1/2)I_e + I_c$$

$$I_6 = (1/2)I_e + I_b$$

$$I_7 = (1/2)I_d + I_a$$

$$I_8 = (1/2)I_d + I_c$$

$$I_9 = (1/2)I_f + I_b$$

$$I_{10} = (1/2)I_f + I_a$$

$$I_{11} = (1/2)I_e + I_c$$

$$I_{12} = (1/2)I_e + I_b$$

ただし、電流記号の下につけたアンダーラインは逆向きの電流であることを表している。

【0031】さらに図2を参照して複合電流の設定を説明すると、図2は、図1との比較のため、ステータ2の内周側と外周側に各ロータに対して別々の回転磁場を発生させる専用のコイルを配置したものである。つまり、内周側コイルd、f、eの配列が内側ロータに対する回転磁場を、また外周側コイルa、c、bの配列が外側ロータに対する回転磁場を発生する。この場合に、2つの専用コイルを共通化して、図1に示した単一のコイルに再構成するには、内周側コイルのうち、コイルdに流す電流の半分ずつをコイルdの近くにあるコイルaとcに負担させ、同様にして、コイルfに流す電流の半分ずつをコイルfの近くにあるコイルbとaに、またコイルeに流す電流の半分ずつをコイルeの近くにあるコイルcとbに負担させればよいわけである。上記複合電流 $I_1 \sim I_{12}$ の式はこのような考え方を数式に表したものである。なお、電流設定の方法はこれに限られるものでなく、後述するように、他の電流設定方法でもかまわない。

【0032】このように電流設定を行うと、単一のコイルでありながら、内側ロータ4に対する回転磁場と外側ロータ3に対する回転磁場との2つの磁場が同時に発生

するが、内側ロータ4の磁石は外側ロータ3に対する回転磁場により回転力を与えられることがなく、また外側ロータ3の磁石が内側ロータ4に対する回転磁場により回転力を与えられることもない。この点は、後述するように、理論解析で証明されている。

【0033】上記Id、If、Ieの電流設定は内側ロータ4の回転に同期して、また上記Ia、Ic、Ibの電流設定は外側ロータ3の回転に同期してそれぞれ行う。トルクの方角に対して位相の進み遅れを設定するが、これは同期モータに対する場合と同じである。

【0034】図3は上記回転電機を制御するためのブロック図である。

【0035】上記複合電流 $I_1 \sim I_{12}$ をステータコイルに供給するため、バッテリーなどの電源11からの直流電流を交流電流に変換するインバータ12を備える。瞬時電流の全ての和は0になるためこのインバータ12は、図4に詳細を示したように、通常の3相ブリッジ型インバータを12相にしたものと同じで、24個のトランジスタ $Tr_1 \sim Tr_{24}$ とこのトランジスタと同数のダイオードから構成される。

【0036】インバータ12の各ゲート（トランジスタのベース）に与えるON、OFF信号はPWM信号である。

【0037】各ロータ3、4を同期回転させるため、各ロータ3、4の位相を検出する回転角センサ13、14が設けられ、これらセンサ13、14からの信号が入力される制御回路15では、外側ロータ3、内側ロータ4に対する必要トルク（正負あり）のデータ（必要トルク指令）に基づいてPWM信号を発生させる。

【0038】このように、本発明の実施の形態では、2つのロータ3、4と1つのステータ2を三層構造かつ同一の軸上に構成するとともに、ステータ2に単一のコイル6を形成し、この単一のコイル6にロータの数と同数の回転磁場が発生するように複合電流を流すようにしたことから、ロータの一方をモータとして、残りをジェネレータとして運転する場合に、モータ駆動電力と発電電力の差の分の電流を単一のコイルに流すだけでよいので、効率を大幅に向上させることができる。

【0039】また、2つのロータに対してインバータが1つでよくなり、さらにロータの一方をモータとして、残りをジェネレータとして運転する場合には、上記のように、モータ駆動電力と発電電力の差の分の電流を単一のコイルに流すだけでよくなることから、インバータの電力スイッチングトランジスタのキャパシタンスを減らすことができ、これによってスイッチング効率が向上し、より全体効率が向上する。

【0040】図5は第2実施形態で、第1実施形態の図1に対応する。

【0041】図1ではコイルを巻回するコア7がコイル6の総数と同数の12個あったのに対して、第2実施形態

は、2つのコイル当たり1個のコア21としたものである。ただし、2つのコイル6に発生する磁束どうしの干渉を避けるため、コア21の円周方向中央にスリット22を設けている。

【0042】第2実施形態では、コア21の総数が第1実施形態の場合の半分の6個となることから、制作工数が減少する。

【0043】図6は第3実施形態で、第2実施形態の図5に対応する。

【0044】図5では外側ロータ3と内側ロータ4の磁極数比（以下単に磁極数比という）が2:1の組み合わせであったのに対して、第3実施形態は、磁極数比が3:1の組み合わせとしたものである。

【0045】磁極数比が3:1の組み合わせでは、磁極数比が2:1の組み合わせの場合と異なり、外側ロータ3の磁石と内側ロータ4の磁石の間に影響が若干発生する。つまり、外側ロータ3の磁石が内側ロータ4に対する回転磁場により回転力を与えられることがないのであるが、内側ロータ4の磁石のほうは、外側ロータ3に与える回転磁場の影響を受けるため、内側ロータ4がトルク変動を生じながら回転するのである。

【0046】しかしながら、この内側ロータ4の回転に対する外側ロータ3の干渉、つまり、内側ロータ4に生じる一定のトルク変動は、後述する理論解析からわかるように、外側ロータ3と内側ロータ4の位相差 $(\omega_1 - \omega_2)$ の関数になることから、予めその一定トルク変動分を打ち消すように、振幅変調を、外側コイルに対する回転磁場を発生させるための交流に対してかけることで、内側ロータ4に生じるトルク変動を打ち消すことができる。

【0047】したがって、この磁極数比が3:1の組み合わせでも、基本的に磁極数比が2:1の組み合わせと同様の作用効果を奏する。

【0048】一方、外側ロータ3の1磁極当たり3個のコイルを設ける点は図5の場合と同じであるため、ステータコイル6の総数が18個（ $=3 \times 6$ ）になる。したがって、ステータコイル6に18相の交流を流すインバータが必要になる。しかしながら、18相の交流は、180度毎に電流が反転するので、18相の半分である9相の交流を発生させるインバータであればよい。つまり、18個のトランジスタとこのトランジスタと同数のダイオードからインバータを構成すればよく、第1、第2の各実施形態よりもインバータを構成するトランジスタとダイオードの数を減らすことができるのである。

【0049】また、3つのコイル当たり1個のコア25とし、このコア25を円周方向に3分割する位置にスリット26を形成することで、第1、第2の各実施形態と同様に、コアの総数を減らしている。

【0050】図7は第4実施形態で、第3実施形態の図6に対応する。

【0051】この実施形態は、ステータコイル6を巻回

するコア31を一体で形成したもので、これによって、図6の場合よりも制作工数がさらに減少する。

【0052】なお、コイル6の3つおきに、幅広のスリット32、33を入れることで、磁気抵抗が大きくなるようにしていることはいうまでもない。

【0053】さて、第1、第2の各実施形態では磁極数比が2:1の組み合わせで、また第3、第4の各実施形態では磁極数比が3:1の組み合わせで説明したが、実は磁極数比の組み合わせはこれに限られるものでなく、以下の理論的解析によればどんな組み合わせでも回転電機として働かせることが可能であることが判明している。

【0054】以下にこの理論的解析を項を分けて説明する。

【0055】〈1〉N(2p-2p)基本形

$$B_1 = B_{m1} \sin(\omega_1 t - \theta) = \mu I_{m1} \sin(\omega_1 t - \theta) \quad \dots(1)$$

$$B_2 = B_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \theta) = \mu I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \theta) \quad \dots(2)$$

ただし、 $B_{m1}$ 、 $B_{m2}$ ：振幅

$\mu$ ：透磁率

$I_{m1}$ ：外側磁石の等価直流電流

$I_{m2}$ ：内側磁石の等価直流電流

$\omega_1$ ：外側磁石の回転角速度

$\omega_2$ ：内側磁石の回転角速度

$$B_c = \mu n (I_{ca}(t) \sin(\theta) + I_{cb}(t) \sin(\theta - 2\pi/3) + I_{cc}(t) \sin(\theta - 4\pi/3)) \quad \dots(3)$$

ただし、 $n$ ：コイル定数

の式により与えることができる。

【0061】(3)式において、 $I_{ca}(t)$ 、 $I_{cb}(t)$ 、 $I_{cc}(t)$ は120度ずつ位相のずれた電流である。

【0062】上記磁束密度 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_c$ の変化を図9に示

$$\begin{aligned} B &= B_1 + B_2 + B_c \\ &= \mu I_{m1} \sin(\omega_1 t - \theta) + \mu I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \theta) \\ &\quad + \mu n (I_{ca}(t) \sin(\theta) + I_{cb}(t) \sin(\theta - 2\pi/3) + I_{cc}(t) \sin(\theta - 4\pi/3)) \end{aligned} \quad \dots(4)$$

ここで、外側磁石 $m_1$ に作用するトルクを $\tau_1$ とすると、直径を中心として線対称的に発生トルクが等しい。したがって $f_1$ を半周分の力とすると、全体の駆動力は $2f_1$ となることから、

$$\tau_1 = 2f_1 \times r_1 \quad (r_1 \text{ は半径})$$

である。

$$\begin{aligned} f_1 &= I_{m1} \times B(\theta = \omega_1 t) \\ &= I_{m1} (\mu I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t) \\ &\quad + \mu n (I_{ca}(t) \sin(\omega_1 t) + I_{cb}(t) \sin(\omega_1 t - 2\pi/3) + I_{cc}(t) \sin(\omega_1 t - 4\pi/3))) \end{aligned} \quad \dots(5)$$

同様に、内側磁石 $m_2$ に作用するトルク $\tau_2$ も直径を中心として線対称的に発生トルクが等しく、したがって $f_2$ を半周分の力とすると、

$$\tau_2 = 2f_2 \times r_2 \quad (r_2 \text{ は半径})$$

$$\begin{aligned} f_2 &= I_{m2} \times B(\theta = \omega_2 t + \alpha) \\ &= I_{m2} (\mu I_{m1} \sin(\omega_1 t - \omega_2 t - \alpha) \\ &\quad + \mu n (I_{ca}(t) \sin(\omega_2 t + \alpha) + I_{cb}(t) \sin(\omega_2 t + \alpha - 2\pi/3) \end{aligned}$$

磁極数比が1:1の組み合わせの場合である。

【0056】ここで、N(2p-2p)の表記について説明しておく、左側の2pが外側磁石(外側ロータ)の磁極数、右側の2pが内側磁石(内側ロータ)の磁極数を表す。また、Nは正の整数であり、(2p-2p)を展開して整数倍し円環にしたものでも同じであることを表している。

【0057】磁極数比が1:1の最もシンプルなのは、外側磁石の磁極数が2、内側磁石の磁極数が2の場合で、これを図8に示す。

【0058】〈1-1〉図8において、外側磁石 $m_1$ 、内側磁石 $m_2$ を等価コイルに置き換えると、各磁石に発生する磁束密度 $B_1$ 、 $B_2$ は次のように表現することができる。

【0059】

$\alpha$ ：2つの磁石の位相差( $t=0$ のとき)

ただし、図8では外側磁石とコイルの位相が合った時刻を0として考える。

【0060】ステータコイルに流す電流を3相交流とすれば、ステータコイルによる磁束密度 $B_c$ は

すと、各磁束密度は正弦波で変化する。

【0063】角度 $\theta$ における全体の磁束密度 $B$ は次のようになる。

【0064】

【0065】トルク $\tau_1$ を考察するには $f_1$ (つまり等価直流電流 $I_{m1}$ が磁場(磁束密度 $B$ )の影響を受けて生じる駆動力)を考えておけばよい。半周には1つの等価直流電流が流れるだけなので、 $f_1$ は次のようになる。

【0066】

である。半周には1つの等価直流電流が流れるだけなので、 $f_2$ は次のようになる。

【0067】

$$+I_{cc}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 4\pi/3))$$

…(6)

〈1-2〉外側回転磁界を与えた場合

コイルに外側磁石の位相に合わせて $\beta$ の位相差電流を流

すため、(3)式の3相交流 $I_{ca}(t)$ 、 $I_{cb}(t)$ 、 $I_{cc}(t)$ を

$$I_{ca}(t) = I_c \cos(\omega_1 t - \beta) \quad \dots (7a)$$

$$I_{cb}(t) = I_c \cos(\omega_1 t - \beta - 2\pi/3) \quad \dots (7b)$$

$$I_{cc}(t) = I_c \cos(\omega_1 t - \beta - 4\pi/3) \quad \dots (7c)$$

ただし、 $I_c$  : 振幅  $\beta$  : 位相のズレ分とする。

力 $f_1$ 、 $f_2$ を計算する。

【0068】(7a)～(7c)式を(5)、(6)式に代入して駆動

【0069】

$$\begin{aligned} f_1 &= I_{m1} \times B (\theta = \omega_1 t) \\ &= I_{m1} (\mu I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t) \\ &\quad + \mu n I_c (\cos(\omega_1 t - \beta) \sin(\omega_1 t) \\ &\quad + \cos(\omega_1 t - \beta - 2\pi/3) \sin(\omega_1 t - 2\pi/3) \\ &\quad + \cos(\omega_1 t - \beta - 4\pi/3) \sin(\omega_1 t - 4\pi/3))) \end{aligned}$$

ここで、 $\cos(a+b) = 1/2(\sin(2a+b) - \sin(b))$  の公式を用いて

$$\begin{aligned} f_1 &= I_{m1} (\mu I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t) \\ &\quad + \mu n I_c (1/2(\sin(2\omega_1 t - \beta) + \sin(\beta)) \\ &\quad + 1/2(\sin(2(\omega_1 t - 2\pi/3) - \beta) + \sin(\beta)) \\ &\quad + 1/2(\sin(2(\omega_1 t - 4\pi/3) - \beta) + \sin(\beta))) \\ &= I_{m1} (\mu I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t) \\ &\quad + 1/2 \mu n I_c (3\sin(\beta) + \sin(2(\omega_1 t - 2\pi/3) - \beta) \\ &\quad + \sin(2(\omega_1 t - 4\pi/3) - \beta))) \\ &= I_{m1} (\mu I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t) \\ &\quad + 1/2 \mu n I_c (3\sin(\beta) + \sin(2\omega_1 t - 4\pi/3 - \beta) \\ &\quad + \sin(2\omega_1 t - 8\pi/3 - \beta))) \\ &= I_{m1} (\mu I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t) \\ &\quad + 1/2 \mu n I_c (3\sin(\beta) + \sin(2\omega_1 t - \beta - 2\pi/3) \\ &\quad + \sin(2\omega_1 t - \beta - 4\pi/3))) \\ &= -I_{m1} (\mu I_{m2} \sin((\omega_2 - \omega_1)t - \alpha) - 3/2 \mu n I_c \sin(\beta)) \quad \dots (8) \end{aligned}$$

(8)式によれば一定トルクの項(第2項)に内側磁石の磁場の影響によるトルク変動(第1項)の項が加算された形と

なっている。

【0070】

$$\begin{aligned} f_2 &= I_{m2} \times B (\theta = \omega_2 t + \alpha) \\ &= I_{m2} (\mu I_{m1} \sin(\omega_1 t - \omega_2 t - \alpha) \\ &\quad + \mu n I_c (\cos(\omega_1 t - \beta) \sin(\omega_2 t + \alpha) \\ &\quad + \cos(\omega_1 t - 2\pi/3 - \beta) \sin(\omega_2 t - 2\pi/3 + \alpha) \\ &\quad + \cos(\omega_1 t - 4\pi/3 - \beta) \sin(\omega_2 t - 4\pi/3 + \alpha))) \end{aligned}$$

ここで、 $\cos(a)\sin(b) = 1/2(\sin(a+b) - \sin(a-b))$  の公式を用いて

$$\begin{aligned} f_2 &= I_{m2} (\mu I_{m1} \sin(\omega_1 t - \omega_2 t - \alpha) \\ &\quad + \mu n I_c 1/2 (\sin(\omega_1 t - \beta + \omega_2 t + \alpha) - \sin(\omega_1 t - \beta - \omega_2 t - \alpha) \\ &\quad + \sin(\omega_1 t - 2\pi/3 - \beta + \omega_2 t - 2\pi/3 + \alpha) - \sin(\omega_1 t - 2\pi/3 - \beta - \omega_2 t + 2\pi/3 - \alpha) \\ &\quad + \sin(\omega_1 t - 4\pi/3 - \beta + \omega_2 t - 4\pi/3 + \alpha) - \sin(\omega_1 t - 4\pi/3 - \beta - \omega_2 t + 4\pi/3 - \alpha)) \\ &= I_{m2} (\mu I_{m1} \sin(\omega_1 t - \omega_2 t - \alpha) \\ &\quad + \mu n I_c 1/2 (\sin((\omega_1 + \omega_2)t + \alpha - \beta) - \sin((\omega_1 - \omega_2)t - \alpha - \beta) \\ &\quad + \sin((\omega_1 + \omega_2)t - 4\pi/3 + \alpha - \beta) - \sin((\omega_1 - \omega_2)t - \alpha - \beta) \\ &\quad + \sin((\omega_1 + \omega_2)t - 8\pi/3 + \alpha - \beta) - \sin((\omega_1 - \omega_2)t - \alpha - \beta)) \\ &= I_{m2} (\mu I_{m1} \sin(\omega_1 t - \omega_2 t - \alpha) \\ &\quad - 3/2 \mu n I_c \sin((\omega_1 - \omega_2)t - \alpha - \beta) \\ &\quad + \mu n I_c 1/2 (\sin((\omega_1 + \omega_2)t + \alpha - \beta) \\ &\quad + \sin((\omega_1 + \omega_2)t + \alpha - \beta - 2\pi/3) \\ &\quad + \sin((\omega_1 + \omega_2)t + \alpha - \beta - 4\pi/3)) \end{aligned}$$

$$= \mu I_m2 (I_m1 \sin((\omega_1 - \omega_2)t - \alpha) - 3/2n I_c \sin((\omega_1 - \omega_2)t - \alpha - \beta)) \cdots (9)$$

〈1-3〉内側回転磁界を与えた場合

コイルに内側磁石の位相に合わせて $\gamma$ の位相差電流を流

すため、今度は上記の3相交流 $I_{ca}(t)$ 、 $I_{cb}(t)$ 、 $I_{cc}(t)$ を

$$I_{ca}(t) = I_c \cos(\omega_2 t - \gamma) \cdots (10a)$$

$$I_{cb}(t) = I_c \cos(\omega_2 t - \gamma - 2\pi/3) \cdots (10b)$$

$$I_{cc}(t) = I_c \cos(\omega_2 t - \gamma - 4\pi/3) \cdots (10c)$$

ただし、 $I_c$ ：振幅  
 $\gamma$ ：位相のズレ分  
とする。

【0071】(10a)～(10c)式を(5)、(6)式に代入して外側磁石と内側磁石の各駆動力 $f_1$ 、 $f_2$ を計算する。

【0072】

$$\begin{aligned} f_1 &= I_m1 (\mu I_m2 \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t) \\ &\quad + \mu n I_c (\cos(\omega_2 t - \gamma) \sin(\omega_1 t) \\ &\quad \quad + \cos(\omega_2 t - \gamma - 2\pi/3) \sin(\omega_1 t - 2\pi/3) \\ &\quad \quad + \cos(\omega_2 t - \gamma - 4\pi/3) \sin(\omega_1 t - 4\pi/3)) \\ \text{ここでも、} \cos(a) \sin(b) &= 1/2 (\sin(a+b) - \sin(a-b)) \text{の公式を用いて} \\ f_1 &= I_m1 (\mu I_m2 \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t) \\ &\quad + 1/2 \mu n I_c (\sin(\omega_2 t - \gamma + \omega_1 t) - \sin(\omega_2 t - \gamma - \omega_1 t) \\ &\quad \quad + \sin(\omega_2 t - \gamma - 2\pi/3 + \omega_1 t - 2\pi/3) - \sin(\omega_2 t - \gamma - 2\pi/3 - \omega_1 t + 2\pi/3) \\ &\quad \quad + \sin(\omega_2 t - \gamma - 4\pi/3 + \omega_1 t - 4\pi/3) - \sin(\omega_2 t - \gamma - 4\pi/3 - \omega_1 t + 4\pi/3)) \\ &= I_m1 (\mu I_m2 \sin((\omega_2 - \omega_1)t + \alpha) \\ &\quad \quad + 1/2 \mu n I_c (\sin((\omega_2 + \omega_1)t - \gamma) - \sin((\omega_2 - \omega_1)t - \gamma) \\ &\quad \quad \quad + \sin((\omega_2 + \omega_1)t - \gamma - 4\pi/3) - \sin((\omega_2 - \omega_1)t - \gamma) \\ &\quad \quad \quad + \sin((\omega_2 + \omega_1)t - \gamma - 8\pi/3) - \sin((\omega_2 - \omega_1)t - \gamma))) \\ &= I_m1 (\mu I_m2 \sin((\omega_2 - \omega_1)t + \alpha) - 3/2 \mu n I_c \sin((\omega_2 - \omega_1)t - \gamma) \\ &\quad \quad + 1/2 \mu n I_c (\sin((\omega_2 + \omega_1)t - \gamma) + \sin((\omega_2 + \omega_1)t - \gamma - 2\pi/3) \\ &\quad \quad \quad + \sin((\omega_2 + \omega_1)t - \gamma - 4\pi/3))) \\ &= -\mu I_m1 (I_m2 \sin((\omega_2 - \omega_1)t - \alpha) - 3/2 n I_c \sin((\omega_1 - \omega_2)t + \gamma)) \end{aligned}$$

(11)式は外側磁石にトルク変動のみが発生することを示している。

【0073】

$$\begin{aligned} f_2 &= I_m2 (\mu I_m1 \sin(\omega_2 t - \omega_1 t - \alpha) \\ &\quad + \mu n I_c (\cos(\omega_2 t - \gamma) \sin(\omega_2 t + \alpha) \\ &\quad \quad + \cos(\omega_2 t - \gamma - 2\pi/3) \sin((\omega_2 t + \alpha - 2\pi/3) \\ &\quad \quad + \cos(\omega_2 t - \gamma - 4\pi/3) \sin((\omega_2 t + \alpha - 4\pi/3))) \\ \text{ここで、} \cos(a) \sin(b) &= 1/2 (\sin(a+b) - \sin(a-b)) \text{を用いて} \\ f_2 &= I_m2 (\mu I_m1 \sin(\omega_1 t - \omega_2 t - \alpha) - 3/2 \mu n I_c \sin(-\alpha - \gamma) \\ &\quad \quad + 1/2 \mu n I_c (\sin(2\omega_2 t + \alpha - \gamma) + \sin(2\omega_2 t + \alpha - \gamma - 2\pi/3) \\ &\quad \quad \quad + \sin(2\omega_2 t + \alpha - \gamma - 4\pi/3))) \\ &= \mu I_m2 (I_m1 \sin((\omega_1 - \omega_2)t - \alpha) + 3/2 n I_c \sin(\alpha + \gamma)) \end{aligned}$$

(12)式によれば、一定トルクの項(第2項)に内側磁石の磁場の影響によるトルク変動の項(第1項)が加算された形をしている。

もに与えた場合

コイルに外側磁石と内側磁石にそれぞれ同期する電流を流すため、上記の $I_{ca}(t)$ 、 $I_{cb}(t)$ 、 $I_{cc}(t)$ を

【0074】〈1-4〉外側回転磁界と内側回転磁界をと

$$I_{ca}(t) = I_c \cos(\omega_1 t - \beta) + I_{c2} \cos(\omega_2 t - \gamma) \cdots (13a)$$

$$I_{cb}(t) = I_c \cos(\omega_1 t - \beta - 2\pi/3) + I_{c2} \cos(\omega_2 t - \gamma - 2\pi/3) \cdots (13b)$$

$$I_{cc}(t) = I_c \cos(\omega_1 t - \beta - 4\pi/3) + I_{c2} \cos(\omega_2 t - \gamma - 4\pi/3) \cdots (13c)$$

とする。

【0075】

$$\begin{aligned} f_1 &= I_m1 (\mu I_m2 \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t) \\ &\quad + \mu n ((I_c \cos(\omega_1 t - \beta) + I_{c2} \cos(\omega_2 t - \gamma)) \sin(\omega_1 t) \\ &\quad \quad + (I_c \cos(\omega_1 t - \beta - 2\pi/3) + I_{c2} \cos(\omega_2 t - \gamma - 2\pi/3)) \sin(\omega_1 t - 2\pi/3) \\ &\quad \quad + (I_c \cos(\omega_1 t - \beta - 4\pi/3) + I_{c2} \cos(\omega_2 t - \gamma - 4\pi/3)) \sin(\omega_1 t - 4\pi/3)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= I_{m1} (\mu I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t) \\
&\quad + \mu n (I_c \cos(\omega_1 t - \beta) \sin(\omega_1 t) \\
&\quad + I_{c2} \cos(\omega_2 t - \gamma) \sin(\omega_1 t) \\
&\quad + I_c \cos(\omega_1 t - \beta - 2\pi/3) \sin(\omega_1 t - 2\pi/3) \\
&\quad + I_{c2} \cos(\omega_2 t - \gamma - 2\pi/3) \sin(\omega_1 t - 2\pi/3) \\
&\quad + I_c \cos(\omega_1 t - \beta - 4\pi/3) \sin(\omega_1 t - 4\pi/3) \\
&\quad + I_{c2} \cos(\omega_2 t - \gamma - 4\pi/3) \sin(\omega_1 t - 4\pi/3))) \\
&= I_{m1} (\mu I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t) \\
&\quad + \mu n (I_c (\cos(\omega_1 t - \beta) \sin(\omega_1 t) \\
&\quad + \cos(\omega_1 t - \beta - 2\pi/3) \sin(\omega_1 t - 2\pi/3) \\
&\quad + \cos(\omega_1 t - \beta - 4\pi/3) \sin(\omega_1 t - 4\pi/3)) \\
&\quad + I_{c2} (\cos(\omega_2 t - \gamma) \sin(\omega_1 t) \\
&\quad + \cos(\omega_2 t - \gamma - 2\pi/3) \sin(\omega_1 t - 2\pi/3) \\
&\quad + \cos(\omega_2 t - \gamma - 4\pi/3) \sin(\omega_1 t - 4\pi/3))) \\
&= I_{m1} (\mu I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t) \\
&\quad + \mu n (I_c (3/2 \sin(\beta)) + I_{c2} (3/2 \sin((\omega_1 - \omega_2)t + \gamma)))) \cdots (14)
\end{aligned}$$

(14)式によれば外側磁石に対する回転位相差( $\beta$ )に応じ 【 0 0 7 6 】  
 た一定トルクに回転変動が乗った形となる。

$$\begin{aligned}
f_2 &= I_{m2} (\mu I_{m1} \sin(\omega_1 t - \omega_2 t - \alpha) \\
&\quad + \mu n (I_c \cos(\omega_1 t - \beta) \\
&\quad + I_{c2} \cos(\omega_2 t - \gamma)) \sin(\omega_2 t + \alpha) \\
&\quad + (I_c \cos(\omega_1 t - \beta - 2\pi/3) \\
&\quad + I_{c2} \cos(\omega_2 t - \gamma - 2\pi/3)) \sin(\omega_2 t + \alpha - 2\pi/3) \\
&\quad + (I_c \cos(\omega_1 t - \beta - 4\pi/3) \\
&\quad + I_{c2} \cos(\omega_2 t - \gamma - 4\pi/3)) \sin(\omega_2 t + \alpha - 4\pi/3))) \\
&= I_{m2} (\mu I_{m1} \sin(\omega_1 t - \omega_2 t - \alpha) \\
&\quad + \mu n (I_c \cos(\omega_1 t - \beta) \sin(\omega_2 t + \alpha) \\
&\quad + I_{c2} \cos(\omega_2 t - \gamma) \sin(\omega_2 t + \alpha) \\
&\quad + I_c \cos(\omega_1 t - \beta - 2\pi/3) \sin(\omega_2 t + \alpha - 2\pi/3) \\
&\quad + I_{c2} \cos(\omega_2 t - \gamma - 2\pi/3) \sin(\omega_2 t + \alpha - 2\pi/3) \\
&\quad + I_c \cos(\omega_1 t - \beta - 4\pi/3) \sin(\omega_2 t + \alpha - 4\pi/3) \\
&\quad + I_{c2} \cos(\omega_2 t - \gamma - 4\pi/3) \sin(\omega_2 t + \alpha - 4\pi/3))) \\
&= I_{m2} (\mu I_{m1} \sin(\omega_1 t - \omega_2 t - \alpha) \\
&\quad + \mu n (I_c (\cos(\omega_1 t - \beta) \sin(\omega_2 t + \alpha) \\
&\quad + \cos(\omega_1 t - \beta - 2\pi/3) \sin(\omega_2 t + \alpha - 2\pi/3) \\
&\quad + \cos(\omega_1 t - \beta - 4\pi/3) \sin(\omega_2 t + \alpha - 4\pi/3)) \\
&\quad + I_{c2} (\cos(\omega_2 t - \gamma) \sin(\omega_2 t + \alpha) \\
&\quad + \cos(\omega_2 t - \gamma - 2\pi/3) \sin(\omega_2 t + \alpha - 2\pi/3) \\
&\quad + \cos(\omega_2 t - \gamma - 4\pi/3) \sin(\omega_2 t + \alpha - 4\pi/3))) \\
\text{ここで、} \cos(a) \sin(b) &= 1/2 (\sin(a+b) - \sin(a-b)) \text{を用いて} \\
f_2 &= I_{m2} (\mu I_{m1} \sin(\omega_1 t - \omega_2 t - \alpha) \\
&\quad + \mu n (I_c (1/2 \sin(\omega_1 t - \beta + \omega_2 t + \alpha) \\
&\quad - \sin(\omega_1 t - \beta - \omega_2 t - \alpha)) \\
&\quad + 1/2 \sin(\omega_1 t - \beta - 2\pi/3 + \omega_2 t + \alpha - 2\pi/3) \\
&\quad - \sin(\omega_1 t - \beta - 2\pi/3 - \omega_2 t - \alpha + 2\pi/3)) \\
&\quad + 1/2 \sin(\omega_1 t - \beta - 4\pi/3 + \omega_2 t + \alpha - 4\pi/3) \\
&\quad - \sin(\omega_1 t - \beta - 4\pi/3 - \omega_2 t - \alpha + 4\pi/3))) \\
&\quad + I_{c2} (1/2 \sin(\omega_2 t - \gamma + \omega_2 t + \alpha) \\
&\quad - \sin(\omega_2 t - \gamma - \omega_2 t - \alpha))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +1/2\sin(\omega_2 t - \gamma - 2\pi/3 + \omega_2 t + \alpha - 2\pi/3) \\
& \quad - \sin(\omega_2 t - \gamma - 2\pi/3 - \omega_2 t - \alpha + 2\pi/3)) \\
& +1/2\sin(\omega_2 t - \gamma - 4\pi/3 + \omega_2 t + \alpha - 4\pi/3) \\
& \quad - \sin(\omega_2 t - \gamma - 4\pi/3 - \omega_2 t - \alpha + 4\pi/3))) \\
= & \operatorname{Im}_2 (\mu \operatorname{Im}_1 \sin(\omega_1 t - \omega_2 t - \alpha) \\
& + \mu n (I_c (1/2\sin(\omega_1 t - \beta + \omega_2 t + \alpha) \\
& \quad - \sin(\omega_1 t - \beta - \omega_2 t - \alpha)) \\
& + 1/2\sin(\omega_1 t - \beta + \omega_2 t + \alpha - 4\pi/3) \\
& \quad - \sin(\omega_1 t - \beta - \omega_2 t - \alpha)) \\
& + 1/2\sin(\omega_1 t - \beta + \omega_2 t + \alpha - 8\pi/3) \\
& \quad - \sin(\omega_1 t - \beta - \omega_2 t - \alpha))) \\
& + I_{c2} (1/2\sin(\omega_2 t - \gamma + \omega_2 t + \alpha) \\
& \quad - \sin(\omega_2 t - \gamma - \omega_2 t - \alpha)) \\
& + 1/2\sin(\omega_2 t - \gamma + \omega_2 t + \alpha - 4\pi/3) \\
& \quad - \sin(\omega_2 t - \gamma - \omega_2 t - \alpha)) \\
& + 1/2\sin(\omega_2 t - \gamma + \omega_2 t + \alpha - 8\pi/3) \\
& \quad - \sin(\omega_2 t - \gamma - \omega_2 t - \alpha))) \\
= & \operatorname{Im}_2 (\mu \operatorname{Im}_1 \sin(\omega_1 t - \omega_2 t - \alpha) \\
& + 1/2 \mu n I_c (\sin(\omega_1 t - \beta + \omega_2 t + \alpha) - \sin(\omega_1 t - \beta - \omega_2 t - \alpha) \\
& \quad + \sin(\omega_1 t - \beta + \omega_2 t + \alpha - 4\pi/3) - \sin(\omega_1 t - \beta - \omega_2 t - \alpha) \\
& \quad + \sin(\omega_1 t - \beta + \omega_2 t + \alpha - 8\pi/3) - \sin(\omega_1 t - \beta - \omega_2 t - \alpha)) \\
& + 1/2 \mu n I_{c2} (\sin(\omega_2 t - \gamma + \omega_2 t + \alpha) - \sin(\omega_2 t - \gamma - \omega_2 t - \alpha) \\
& \quad + \sin(\omega_2 t - \gamma + \omega_2 t + \alpha - 4\pi/3) - \sin(\omega_2 t - \gamma - \omega_2 t - \alpha) \\
& \quad + \sin(\omega_2 t - \gamma + \omega_2 t + \alpha - 8\pi/3) - \sin(\omega_2 t - \gamma - \omega_2 t - \alpha)) \\
= & \operatorname{Im}_2 (\mu \operatorname{Im}_1 \sin(\omega_1 t - \omega_2 t - \alpha) \\
& + 1/2 \mu n I_c (-3\sin((\omega_2 - \omega_1)t - \alpha - \beta)) \\
& + 1/2 \mu n I_{c2} (-3\sin(-\alpha - \gamma)) \\
= & \operatorname{Im}_2 (\mu \operatorname{Im}_1 \sin(\omega_1 t - \omega_2 t - \alpha) \\
& - 3/2 \mu n I_c \sin((\omega_2 - \omega_1)t - \alpha - \beta) \\
& + 3/2 \mu n I_{c2} 3\sin(\alpha + \gamma)) \quad \dots (15)
\end{aligned}$$

(15)式も内側磁石に対する回転位相差 $(\alpha + \gamma)$ に応じた一定トルクに回転変動が乗った形となる。

このようにして得られた上記(8)、(9)、(11)、(12)、(14)、(15)の式を次に並べる。

【0077】 <1-5> まとめ

【0078】

外側回転磁界を与えた場合

$$f_1 = -\mu \operatorname{Im}_1 (\operatorname{Im}_2 \sin((\omega_2 - \omega_1)t - \alpha) - 3/2n I_c \sin(\beta)) \quad \dots (8)$$

$$f_2 = \mu \operatorname{Im}_2 (\operatorname{Im}_1 \sin((\omega_1 - \omega_2)t - \alpha) - 3/2n I_c \sin((\omega_1 - \omega_2)t - \alpha - \beta)) \quad \dots (9)$$

内側回転磁界を与えた場合

$$f_1 = -\mu \operatorname{Im}_1 (\operatorname{Im}_2 \sin((\omega_2 - \omega_1)t - \alpha) - 3/2 n I_c \sin((\omega_1 - \omega_2)t + \gamma)) \quad \dots (11)$$

$$f_2 = \mu \operatorname{Im}_2 (\operatorname{Im}_1 \sin((\omega_1 - \omega_2)t - \alpha) + 3/2 n I_c \sin(\alpha + \gamma)) \quad \dots (12)$$

外側回転磁界と内側回転磁界をともに与えた場合

$$f_1 = \operatorname{Im}_1 (\mu \operatorname{Im}_2 \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t) + \mu n (I_c (3/2\sin(\beta)) + I_{c2} (3/2 \sin((\omega_1 - \omega_2)t + \gamma)))) \quad \dots (14)$$

$$f_2 = \mu \operatorname{Im}_2 (\operatorname{Im}_1 \sin(\omega_1 t - \omega_2 t - \alpha) + 3/2n I_c \sin((\omega_1 - \omega_2)t - \alpha - \beta) + 3/2n I_{c2} \sin(\alpha + \gamma)) \quad \dots (15)$$

これらの式のもつ意味は次の通りである。(8)式の右辺第2項、(12)式の右辺第2項、(14)式の右辺第2項、(15)

式の右辺第3項だけが固定項(一定値)であり、固定項が含まれるときだけ回転トルクが発生する。これに対し

て、固定項以外の項は三角関数であるため、駆動力 $f$ の平均値がゼロとなり、したがって、固定項以外の項によっては回転トルクが発生しない。つまり、外側磁石に同期させてステータコイルに電流を流したときは外側磁石にのみ、内側磁石に同期させてステータコイルに電流を流したときは内側磁石にのみ回転トルクが発生し、外側磁石と内側磁石のそれぞれに同期させてステータコイルに電流を流すと、両方の磁石にそれぞれ回転トルクが発生する。

【0079】このことから、磁極数比が1:1の組み合わせであるとき、回転電機として働くことが可能であることが証明された。これより類推して磁極数が任意の組み合わせであるときにも、回転電機として働くことが可能である。

【0080】〈1-6〉トルク変動の抑制

$$f_1 = A + I_c C + I_{c2} V$$

ただし、 $A = \mu I_{m1} I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t)$

$V = I_{m1} \frac{3}{2} \sin((\omega_1 - \omega_2)t + \gamma)$

$C = \mu n I_{m1} I_c (3/2 \sin(\beta))$

ここで、 $I_c = (C1 - A - I_{c2} V) / C$ という変調を加えれば $f_1 = C1$ (定数)となり、外側磁石の回転からトルク変動が解消される。

$$f_2 = -A + I_c D + I_{c2} E$$

ただし、 $D = 3/2 \mu I_{m2} n \sin((\omega_1 - \omega_2)t - \alpha - \beta)$

$E = 3/2 \mu I_{m2} n \sin(\alpha + \gamma)$

ここで、 $I_{c2} = (C2 + A - I_c D) / E$ という変調を加えれば、 $f_2 = C2$ (定数)となり、内側磁石の回転からトルク変動が解消される。

$$C1 = A + I_c C + I_{c2} V$$

$$C2 = -A + I_c D + I_{c2} E$$

〈2〉N(2(2p)-2p)基本形

〈2-1〉図10を参照して磁極数比が2:1(図10では外側磁石の磁極数が4、内側磁石の磁極数が2)であると

$$B_1 = B_{m1} \sin(2\omega_1 t - 2\theta) = \mu I_{m1} \sin(2\omega_1 t - 2\theta) \quad \dots(21)$$

となるのに対して、内側磁石に発生する磁束密度 $B_2$ は上

$$B_2 = B_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \theta) = \mu I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \theta) \quad \dots(22)$$

である。

【0088】ステータコイルの作る磁場は、外側回転磁界用と内側回転磁界用に分けて計算するため、図10の

$$B_{c1} = \mu n (I_{ca}(t) \sin(2\theta) + I_{cb}(t) \sin(2\theta - 2\pi/3) + I_{cc}(t) \sin(2\theta - 4\pi/3)) \quad \dots(23)$$

$$B_{c2} = \mu n (I_{cd}(t) \sin(\theta) + I_{ce}(t) \sin(\theta - 2\pi/3) + I_{cf}(t) \sin(\theta - 4\pi/3)) \quad \dots(24)$$

とする。

【0089】ただし、 $I_{ca}(t)$ 、 $I_{cb}(t)$ 、 $I_{cc}(t)$ のほか、 $I_{cd}(t)$ 、 $I_{ce}(t)$ 、 $I_{cf}(t)$ も120度位相のずれた電流である。

【0090】上記の磁束密度 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_{c1}$ 、 $B_{c2}$ の変化を

$$B = B_1 + B_2 + B_{c1} + B_{c2} \\ = \mu I_{m1} \sin(2\omega_1 t - 2\theta) + \mu I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \theta)$$

一方、固定項を含む式において固定項の残りの項、つまり(8)式の右辺第1項、(14)式の右辺第1項および第3項により2つの磁石の位相差 $(\omega_1 - \omega_2)$ に応じた一定のトルク変動が外側磁石の回転に、また(12)式の右辺第1項、(15)式の右辺第1項および第2項により同じく2つの磁石の位相差 $(\omega_1 - \omega_2)$ に応じた一定のトルク変動が内側磁石の回転に生じる。

【0081】そこで、外側回転磁界と内側回転磁界をもとに与えた場合にトルク変動を抑えることを考える。上記の(14)式より

$$f_1 = \mu I_{m1} I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t) + I_c \mu n I_{m1} I_c (3/2 \sin(\beta)) + I_{c2} I_{m1} \frac{3}{2} \sin((\omega_1 - \omega_2)t + \gamma)$$

であるから、 $f_1$ を次のようにおく。

【0082】

…(16)

【0083】同様にして、上記の(15)式より

$$f_2 = \mu I_{m2} I_{m1} \sin(\omega_1 t - \omega_2 t - \alpha) + I_c \frac{3}{2} \mu I_{m2} n \sin((\omega_1 - \omega_2)t - \alpha - \beta) + I_{c2} \frac{3}{2} \mu I_{m2} n \sin(\alpha + \gamma)$$

であるから、 $f_2$ を次のようにおく。

【0084】

…(17)

【0085】したがって、両方の磁石とも一定回転にするには、次の連立2元方程式を $I_c$ 、 $I_{c2}$ について解けばよい。

【0086】

…(18)

…(19)

きを考える。

【0087】各磁石を等価コイルに置き換えると、外側磁石に発生する磁束密度 $B_1$ は

記(2)式と同じ、つまり

ようにコイルを配置し、外周側と内周側の各磁石用のステータコイルによる磁束密度 $B_{c1}$ 、 $B_{c2}$ を、

モデル的に図11に示す。

【0091】角度 $\theta$ での磁束密度 $B$ は上記4つの磁束密度の和である。

【0092】

$$\begin{aligned}
& +\mu n(I_{ca}(t)\sin(2\theta)+I_{cb}(t)\sin(2\theta-2\pi/3) \\
& \quad +I_{cc}(t)\sin(2\theta-4\pi/3)) \\
& +\mu n(I_{cd}(t)\sin(\theta)+I_{ce}(t)\sin(\theta-2\pi/3) \\
& \quad +I_{cf}(t)\sin(\theta-4\pi/3)) \quad \dots(25)
\end{aligned}$$

外側磁石 $m_1$ に作用するトルクを $\tau_1$ とすると、

$$\tau_1 = f_1 \times r_1 \quad (r_1 \text{ は半径})$$

である。図 10 では直径を中心として線対称的に発生トルクが等しくならないので、一周の全てについて考え

る。一周に4つの等価直流電流が流れるので、これら4つの電流に働く力の和が $f_1$ となる。

【0093】

$$\begin{aligned}
f_1 &= I_{m1} \times B(\theta = \omega_1 t) + I_{m1} \times B(\theta = \omega_1 t + \pi) \\
& \quad - I_{m1} \times B(\theta = \omega_1 t + \pi/2) \\
& \quad - I_{m1} \times B(\theta = \omega_1 t + 3\pi/2) \\
&= \mu I_{m1} (I_{m1} \sin(2\omega_1 t - 2\omega_1 t) + I_{m1} \sin(2\omega_1 t - 2\omega_1 t - 2\pi) \\
& \quad - I_{m1} \sin(2\omega_1 t - 2\omega_1 t - \pi) \\
& \quad - I_{m1} \sin(2\omega_1 t - 2\omega_1 t + 3\pi) \\
& \quad + I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t) + I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t + \pi) \\
& \quad - I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t + \pi/2) \\
& \quad - I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t + \pi/2) \\
& \quad + n(I_{ca}(t)\sin(2\omega_1 t) + I_{cb}(t)\sin(2\omega_1 t - 2\pi/3) \\
& \quad + I_{cc}(t)\sin(2\omega_1 t - 4\pi/3)) \\
& \quad + n(I_{ca}(t)\sin(2\omega_1 t + 2\pi) + I_{cb}(t)\sin(2\omega_1 t + 2\pi - 2\pi/3) \\
& \quad + I_{cc}(t)\sin(2\omega_1 t + 2\pi - 4\pi/3)) \\
& \quad - n(I_{ca}(t)\sin(2\omega_1 t + \pi) + I_{cb}(t)\sin(2\omega_1 t + \pi/3) \\
& \quad + I_{cc}(t)\sin(2\omega_1 t - \pi/3) \\
& \quad - n(I_{ca}(t)\sin(2\omega_1 t + \pi) + I_{cb}(t)\sin(2\omega_1 t + \pi/3) \\
& \quad + I_{cc}(t)\sin(2\omega_1 t - \pi/3)) \\
& \quad + n(I_{cd}(t)\sin(\omega_1 t) + I_{ce}(t)\sin(\omega_1 t - 2\pi/3) \\
& \quad + I_{cf}(t)\sin(\omega_1 t - 4\pi/3)) \\
& \quad + n(I_{cd}(t)\sin(\omega_1 t + \pi) + I_{ce}(t)\sin(\omega_1 t + \pi - 2\pi/3) \\
& \quad + I_{cf}(t)\sin(\omega_1 t + \pi - 4\pi/3)) \\
& \quad - n(I_{cd}(t)\sin(\omega_1 t + \pi/2) + I_{ce}(t)\sin(\omega_1 t + \pi/2 - 2\pi/3) \\
& \quad + I_{cf}(t)\sin(\omega_1 t + \pi/2 - 4\pi/3)) \\
& \quad - n(I_{cd}(t)\sin(\omega_1 t + 3\pi/2) + I_{ce}(t)\sin(\omega_1 t + 3\pi/2 - 2\pi/3) \\
& \quad + I_{cf}(t)\sin(\omega_1 t + 3\pi/2 - 4\pi/3)) \\
&= 4\mu I_{m1} n (I_{ca}(t)\sin(2\omega_1 t) + I_{cb}(t)\sin(2\omega_1 t - 2\pi/3) \\
& \quad + I_{cc}(t)\sin(2\omega_1 t - 4\pi/3)) \quad \dots(26)
\end{aligned}$$

(26)式によれば、コイルa、b、cの励磁電流によって外側磁石に作用するトルクをコントロールできることを示している。また、コイルd、e、fの励磁電流の影響を受けないことも示している。

【0094】次に、内側磁石 $m_2$ に作用するトルクを $\tau_2$

とすると、

$$\tau_2 = f_2 \times r_2 \quad (r_2 \text{ は半径})$$

である。一周に2つの等価直流電流が流れるので、これら2つの電流に働く力の和が $f_2$ となる。

【0095】

$$\begin{aligned}
f_2 &= I_{m2} \times B(\theta = \omega_2 t + \alpha) - I_{m2} \times B(\theta = \omega_2 t + \pi + \alpha) \\
&= \mu I_{m2} (I_{m1} \sin(2\omega_1 t - 2\omega_2 t - 2\alpha) - I_{m1} \sin(2\omega_1 t - 2\omega_2 t - 2\alpha - 2\pi) \\
& \quad + I_{m2} \sin(2\omega_2 t + 2\alpha - 2\omega_2 t - 2\alpha) \\
& \quad - I_{m2} \sin(2\omega_2 t + 2\alpha - 2\omega_2 t - 2\alpha - 2\pi) \\
& \quad + n(I_{ca}(t)\sin(2\omega_2 t + 2\alpha) + I_{cb}(t)\sin(2\omega_2 t + 2\alpha - 2\pi/3) \\
& \quad + I_{cc}(t)\sin(2\omega_2 t + 2\alpha - 4\pi/3) \\
& \quad - n(I_{ca}(t)\sin(2\omega_2 t + 2\pi + 2\alpha) + I_{cb}(t)\sin(2\omega_2 t + 2\pi + 2\alpha - 2\pi/3) \\
& \quad + I_{cc}(t)\sin(2\omega_2 t + 2\pi + 2\alpha - 4\pi/3) \\
& \quad + n(I_{cd}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha) + I_{ce}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 2\pi/3) \\
& \quad + I_{cf}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 4\pi/3))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -n(I_{cd}(t)\sin(\omega_2 t + \pi + \alpha) + I_{ce}(t)\sin(\omega_2 t + \pi + \alpha - 2\pi/3) \\
 & \quad + I_{cf}(t)\sin(\omega_2 t + \pi + \alpha - 4\pi/3)) \\
 & = 2\mu I_{m2} n (I_{cd}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha) + I_{ce}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 2\pi/3) \\
 & \quad + I_{cf}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 4\pi/3)) \quad \cdots (27)
 \end{aligned}$$

(27)式によれば、コイルd、e、fの励磁電流によって内側磁石に作用するトルクをコントロールでき、また、コイルa、b、cの励磁電流の影響を受けないことを示している。

【0096】〈2-2〉外側回転磁界を与えた場合

コイルa、b、cに外側磁石に合わせて $\beta$ の位相差の電流を流す。つまり、上記の3相交流 $I_{ca}(t)$ 、 $I_{cb}(t)$ 、 $I_{cc}(t)$ は

$$I_{ca}(t) = I_c \cos(2\omega_1 t - 2\beta) \quad \cdots (28a)$$

$$I_{cb}(t) = I_c \cos(2\omega_1 t - 2\beta - 2\pi/3) \quad \cdots (28b)$$

$$I_{cc}(t) = I_c \cos(2\omega_1 t - 2\beta - 4\pi/3) \quad \cdots (28c)$$

である。(28a)～(28c)を(26)、(27)式に代入して $f_1$ を計算する。

【0097】

$$\begin{aligned}
 f_1 & = 4\mu I_{m1} n I_c (\cos(2\omega_1 t - 2\beta) \sin(2\omega_1 t) \\
 & \quad + \cos(2\omega_1 t - 2\beta - 2\pi/3) \sin(2\omega_1 t - 2\pi/3) \\
 & \quad + \cos(2\omega_1 t - 2\beta - 4\pi/3) \sin(2\omega_1 t - 4\pi/3)) \\
 \text{ここで、} \cos(a)\sin(b) & = 1/2(\sin(a+b) - \sin(a-b)) \text{の公式を用いて} \\
 f_1 & = 4\mu I_{m1} n I_c (1/2(\sin(2\omega_1 t - 2\beta + 2\omega_1 t) \\
 & \quad - \sin(2\omega_1 t - 2\beta - 2\omega_1 t)) \\
 & \quad + 1/2(\sin(2\omega_1 t - 2\beta - 2\pi/3 + 2\omega_1 t - 2\pi/3) \\
 & \quad - \sin(2\omega_1 t - 2\beta - 2\pi/3 - 2\omega_1 t + 2\pi/3)) \\
 & \quad + 1/2(\sin(2\omega_1 t - 2\beta - 4\pi/3 + 2\omega_1 t - 4\pi/3) \\
 & \quad - \sin(2\omega_1 t - 2\beta - 4\pi/3 - 2\omega_1 t + 4\pi/3))) \\
 & = 2\mu I_{m1} n I_c (\sin(4\omega_1 t - 2\beta) + \sin(2\beta) \\
 & \quad + \sin(4\omega_1 t - 2\beta - 4\pi/3) + \sin(2\beta) \\
 & \quad + \sin(4\omega_1 t - 2\beta - 8\pi/3) + \sin(2\beta)) \\
 & = 2\mu I_{m1} n I_c (\sin(4\omega_1 t - 2\beta) \\
 & \quad + \sin(4\omega_1 t - 2\beta - 4\pi/3) \\
 & \quad + \sin(4\omega_1 t - 2\beta - 4\pi/3) \\
 & \quad + 3\sin(2\beta)) \\
 & = 6\mu I_{m1} n I_c \sin(2\beta) \quad \cdots (29)
 \end{aligned}$$

(29)式によれば、位相差( $\beta$ )に応じて外側磁石のトルクが変化することを示している。したがって、外側磁石の回転角度を計測し、それに対し $\beta$ だけ位相をずらしてコイルa、b、cに励磁電流を供給すればよいことがわか

る。

【0098】〈2-3〉内側回転磁界を与えた場合

コイルd、e、fに外側磁石に合わせて $\gamma$ の位相差電流を流すため、 $I_{cd}(t)$ 、 $I_{ce}(t)$ 、 $I_{cf}(t)$ を

$$I_{cd}(t) = I_c \cos(\omega_2 t - \gamma) \quad \cdots (30a)$$

$$I_{ce}(t) = I_c \cos(\omega_2 t - \gamma - 2\pi/3) \quad \cdots (30b)$$

$$I_{cf}(t) = I_c \cos(\omega_2 t - \gamma - 4\pi/3) \quad \cdots (30c)$$

とする。

る。

【0099】これらを(27)式に代入して $f_2$ を計算す

【0100】

$$\begin{aligned}
 f_2 & = 2\mu I_{m2} n (I_c \cos(\omega_2 t - \gamma) \sin(\omega_2 t + \alpha) \\
 & \quad + I_c \cos(\omega_2 t - \gamma - 2\pi/3) \sin(\omega_2 t + \alpha - 2\pi/3) \\
 & \quad + I_c \cos(\omega_2 t - \gamma - 4\pi/3) \sin(\omega_2 t + \alpha - 4\pi/3)) \\
 \text{ここで、} \cos(a)\sin(b) & = 1/2(\sin(a+b) - \sin(a-b)) \text{の公式を用いて} \\
 f_2 & = 2\mu I_{m2} n I_c (1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma + \omega_2 t + \alpha) \\
 & \quad - \sin(\omega_2 t - \gamma - \omega_2 t - \alpha)) \\
 & \quad + 1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma - 2\pi/3 + \omega_2 t + \alpha - 2\pi/3) \\
 & \quad - \sin(\omega_2 t - \gamma - 2\pi/3 - \omega_2 t - \alpha + 2\pi/3)) \\
 & \quad + 1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma - 4\pi/3 + \omega_2 t + \alpha - 4\pi/3) \\
 & \quad - \sin(\omega_2 t - \gamma - 4\pi/3 - \omega_2 t - \alpha + 4\pi/3))
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \mu I_m 2 n I_c (\sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha) + \sin(\gamma + \alpha) \\
&\quad + \sin(2\omega_2 t - \gamma - 4\pi/3 + \alpha) + \sin(\gamma + \alpha) \\
&\quad + \sin(2\omega_2 t - \gamma - 8\pi/3 + \alpha) + \sin(\gamma + \alpha)) \\
&= \mu I_m 2 n I_c (\sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha) + \sin(2\omega_2 t - \gamma - 4\pi/3 + \alpha) \\
&\quad + \sin(2\omega_2 t - \gamma - 8\pi/3 + \alpha) \\
&\quad + 3\sin(\gamma + \alpha)) \\
&= 3\mu I_m 2 n I_c \sin(\gamma + \alpha) \quad \dots (31)
\end{aligned}$$

(31)式によれば位相差 $(\gamma + \alpha)$ により内側磁石のトルクが変化することを示している。したがって、内側磁石の回転角度を計測し、それに対し $(\gamma + \alpha)$ だけ位相をずらしてコイルd、e、fに励磁電流を供給すればよいことがわかる。

#### 【0101】〈2-4〉まとめ

(29)式は外側磁石に同期させてステータコイルに電流を流したときは外側磁石にのみ、また(31)式は内側磁石に同期させてステータコイルに電流を流したときは内側磁石にのみ回転トルクが発生する。それぞれの磁界はそれぞれの相電流にしか対応しないため、計算はしなかったが、外側磁石と内側磁石のそれぞれに同期させてステータコイルに電流を流すと、両方の磁石にそれぞれ回転トルクが発生する。

【0102】このことから、磁極数比が2:1の組み合わせであるときにも、回転電機として働くことが可能であることが証明された。

【0103】〈2-5〉ステータコイルに流す電流の設定  
図10では理論計算のため、外側回転磁場を発生させるための専用コイルと、内側回転磁場を発生させるための専用コイルとを考えたが、いま図12に示したように、コイルを共用させることを考える。図10において、コイルaとd、コイルbとf、コイルcとe、コイルaとd、コイルbとf、コイルcとeをまとめることができる。そこで、図10と図12のコイルを対照させると、図12のコイル1~12に流す複合電流 $I_1 \sim I_{12}$ は、

$$\begin{aligned}
I_1 &= I_a + I_d \\
I_2 &= I_c \\
I_3 &= I_b + I_f \\
I_4 &= I_a \\
I_5 &= I_c + I_e \\
I_6 &= I_b \\
I_7 &= I_a + I_d \\
I_8 &= I_c \\
I_9 &= I_b + I_f \\
I_{10} &= I_a \\
I_{11} &= I_c + I_e \\
I_{12} &= I_b
\end{aligned}$$

であればよいことがわかる。

【0104】この場合、 $I_1$ 、 $I_3$ 、 $I_5$ 、 $I_7$ 、 $I_9$ 、 $I_{11}$ の各電流を流すコイルの負担が、 $I_2$ 、 $I_4$ 、 $I_6$ 、 $I_8$ 、 $I_{10}$ 、 $I_{12}$ の各電流を流す残りのコイルよりも大きくなるため、残りのコイルにも負担を分散させて内側回転磁界を形成さ

せることを考える。

【0105】たとえば、図2と図1を対照すると、図1の1、1、2、2に対応する部分は、図2では外周側コイルのa、a、c、cと内周側コイルのd、dである。この場合に、コイルd、dの位相を等価的にずらした状態を考え、そのずらせたものを新たにコイル $d'$ 、 $d'$ とすると、このうちコイル $d'$ に流す電流 $I_{d'}$ の半分ずつをコイルaとcに、またコイル $d'$ に流す電流 $I_{d'}$ の半分ずつをコイルaとcに割り振る。残りも同様である。

【0106】このようにすることで、別の電流設定として

$$\begin{aligned}
I_1 &= I_a + (1/2)I_{d'} \\
I_2 &= I_c + (1/2)I_{d'} \\
I_3 &= I_b + (1/2)I_{f'} \\
I_4 &= I_a + (1/2)I_{f'} \\
I_5 &= I_c + (1/2)I_{e'} \\
I_6 &= I_b + (1/2)I_{e'} \\
I_7 &= I_a + (1/2)I_{d'} \\
I_8 &= I_c + (1/2)I_{d'} \\
I_9 &= I_b + (1/2)I_{f'} \\
I_{10} &= I_a + (1/2)I_{f'} \\
I_{11} &= I_c + (1/2)I_{e'} \\
I_{12} &= I_b + (1/2)I_{e'}
\end{aligned}$$

が得られる。ただし、コイル $e'$ 、 $f'$ もコイルe、fを等価的にずらしたものである。

【0107】さらに考えると、

$$\begin{aligned}
I_1 &= I_a + I_{xi} \\
I_2 &= I_c + I_{xi} \\
I_3 &= I_b + I_{xii} \\
I_4 &= I_a + I_{iv} \\
I_5 &= I_c + I_{iv} \\
I_6 &= I_b + I_{vi} \\
I_7 &= I_a + I_{vii} \\
I_8 &= I_c + I_{viii} \\
I_9 &= I_b + I_{ix} \\
I_{10} &= I_a + I_{ix} \\
I_{11} &= I_c + I_{xi} \\
I_{12} &= I_b + I_{xii}
\end{aligned}$$

でもかまわない。つまり、これら $I_1 \sim I_{12}$ の式の右辺第2項の電流 $I_{xi} \sim I_{xii}$ は図13に示したように12相交流となるわけで、この12相交流で内側回転磁界を形成するようにすればよいのである。

【0108】〈2-6〉12相交流で内側回転磁界を与える

場合

と、このときの磁束密度 $B_{c2}$ は次のようになる。

〈2-6-1〉 12相交流で内側回転磁界を作ること考える

【0 1 0 9】

$$\begin{aligned}
 B_{c2} = \mu n & (I_{c1}(t)\sin(\theta) + I_{c11}(t)\sin(\theta - 2\pi/12) \\
 & + I_{c111}(t)\sin(\theta - 4\pi/12) \\
 & + I_{c1v}(t)\sin(\theta - 6\pi/12) \\
 & + I_{c1v1}(t)\sin(\theta - 8\pi/12) \\
 & + I_{c1v11}(t)\sin(\theta - 10\pi/12) \\
 & + I_{c1v111}(t)\sin(\theta - 12\pi/12) \\
 & + I_{c1v1111}(t)\sin(\theta - 14\pi/12) \\
 & + I_{c1x}(t)\sin(\theta - 16\pi/12) \\
 & + I_{c1x1}(t)\sin(\theta - 18\pi/12) \\
 & + I_{c1x11}(t)\sin(\theta - 20\pi/12) \\
 & + I_{c1x111}(t)\sin(\theta - 22\pi/12)) \quad \dots(32)
 \end{aligned}$$

このとき、全体の磁束密度 $B$ は次のようになる。

【0 1 1 0】

$$\begin{aligned}
 B &= B_1 + B_2 + B_{c1} + B_{c2} \\
 &= \mu I_{m1} \sin(3\omega_1 t - 3\theta) + \mu I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \theta) \\
 &\quad + \mu n (I_{ca}(t)\sin(3\theta) + I_{cb}(t)\sin(3\theta - 2\pi/3) \\
 &\quad \quad + I_{cc}(t)\sin(3\theta - 4\pi/3) \\
 &\quad + \mu n (I_{c1}(t)\sin(\theta) + I_{c11}(t)\sin(\theta - 2\pi/12) \\
 &\quad \quad + I_{c111}(t)\sin(\theta - 4\pi/12) \\
 &\quad \quad + I_{c1v}(t)\sin(\theta - 6\pi/12) \\
 &\quad \quad + I_{c1v1}(t)\sin(\theta - 8\pi/12) \\
 &\quad \quad + I_{c1v11}(t)\sin(\theta - 10\pi/12) \\
 &\quad \quad + I_{c1v111}(t)\sin(\theta - 12\pi/12) \\
 &\quad \quad + I_{c1v1111}(t)\sin(\theta - 14\pi/12) \\
 &\quad \quad + I_{c1x}(t)\sin(\theta - 16\pi/12) \\
 &\quad \quad + I_{c1x1}(t)\sin(\theta - 18\pi/12) \\
 &\quad \quad + I_{c1x11}(t)\sin(\theta - 20\pi/12) \\
 &\quad \quad + I_{c1x111}(t)\sin(\theta - 22\pi/12)) \quad \dots(33)
 \end{aligned}$$

このときの $f_1$ を計算してみると、

$$\begin{aligned}
 f_1 &= I_{m1} \times B(\theta = \omega_1 t) + I_{m1} \times B(\theta = \omega_1 t + \pi) \\
 &\quad - I_{m1} \times B(\theta = \omega_1 t + \pi/2) \\
 &\quad - I_{m1} \times B(\theta = \omega_1 t + 3\pi/2) \\
 &= \mu I_{m1} (I_{m1} \sin(2\omega_1 t - 2\omega_1 t) + I_{m1} \sin(2\omega_1 t - 2\omega_1 t - 2\pi) \\
 &\quad - I_{m1} \sin(2\omega_1 t - 2\omega_1 t - \pi) \\
 &\quad - I_{m1} \sin(2\omega_1 t - 2\omega_1 t + 3\pi) \\
 &\quad + I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t) \\
 &\quad + I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t + \pi) \\
 &\quad - I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t + \pi/2) \\
 &\quad - I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t + \pi/2) \\
 &\quad + n(I_{ca}(t)\sin(2\omega_1 t) + I_{cb}(t)\sin(2\omega_1 t - 2\pi/3) \\
 &\quad \quad + I_{cc}(t)\sin(2\omega_1 t - 4\pi/3)) \\
 &\quad + n(I_{ca}(t)\sin(2\omega_1 t + 2\pi) + I_{cb}(t)\sin(2\omega_1 t + 2\pi - 2\pi/3) \\
 &\quad \quad + I_{cc}(t)\sin(2\omega_1 t + 2\pi - 4\pi/3)) \\
 &\quad - n(I_{ca}(t)\sin(2\omega_1 t + \pi) + I_{cb}(t)\sin(2\omega_1 t + \pi/3) \\
 &\quad \quad + I_{cc}(t)\sin(2\omega_1 t + 2\pi - \pi/3)) \\
 &\quad - n(I_{ca}(t)\sin(2\omega_1 t + \pi) + I_{cb}(t)\sin(2\omega_1 t + \pi/3) \\
 &\quad \quad + I_{cc}(t)\sin(2\omega_1 t + 2\pi - \pi/3)) \\
 &\quad + n(I_{c1}(t)(\sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_1 t + \pi)) \\
 &\quad \quad - \sin(\omega_1 t + \pi/2))
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\sin(\omega_1 t + 3\pi/2)) \\
& +I_{c11}(t)(\sin(\omega_1 t - 2\pi/12) + \sin(\omega_1 t - 2\pi/12 + \pi) \\
& \quad -\sin(\omega_1 t - 2\pi/12 + \pi/2) \\
& \quad -\sin(\omega_1 t - 2\pi/12 + 3\pi/2)) \\
& +I_{c111}(t)(\sin(\omega_1 t - 4\pi/12) + \sin(\omega_1 t - 4\pi/12 + \pi) \\
& \quad -\sin(\omega_1 t - 4\pi/12 + \pi/2) \\
& \quad -\sin(\omega_1 t - 4\pi/12 + 3\pi/2)) \\
& +I_{c11v}(t)(\sin(\omega_1 t - 6\pi/12) + \sin(\omega_1 t - 6\pi/12 + \pi) \\
& \quad -\sin(\omega_1 t - 6\pi/12 + \pi/2) \\
& \quad -\sin(\omega_1 t - 6\pi/12 + 3\pi/2)) \\
& +I_{c1v}(t)(\sin(\omega_1 t - 8\pi/12) + \sin(\omega_1 t - 8\pi/12 + \pi) \\
& \quad -\sin(\omega_1 t - 8\pi/12 + \pi/2) \\
& \quad -\sin(\omega_1 t - 8\pi/12 + 3\pi/2)) \\
& +I_{c1v1}(t)(\sin(\omega_1 t - 10\pi/12) + \sin(\omega_1 t - 10\pi/12 + \pi) \\
& \quad -\sin(\omega_1 t - 10\pi/12 + \pi/2) \\
& \quad -\sin(\omega_1 t - 10\pi/12 + 3\pi/2)) \\
& +I_{c1v11}(t)(\sin(\omega_1 t - 12\pi/12) + \sin(\omega_1 t - 12\pi/12 + \pi) \\
& \quad -\sin(\omega_1 t - 12\pi/12 + \pi/2) \\
& \quad -\sin(\omega_1 t - 12\pi/12 + 3\pi/2)) \\
& +I_{c1v111}(t)(\sin(\omega_1 t - 14\pi/12) + \sin(\omega_1 t - 14\pi/12 + \pi) \\
& \quad -\sin(\omega_1 t - 14\pi/12 + \pi/2) \\
& \quad -\sin(\omega_1 t - 14\pi/12 + 3\pi/2)) \\
& +I_{c1v11v}(t)(\sin(\omega_1 t - 16\pi/12) + \sin(\omega_1 t - 16\pi/12 + \pi) \\
& \quad -\sin(\omega_1 t - 16\pi/12 + \pi/2) \\
& \quad -\sin(\omega_1 t - 16\pi/12 + 3\pi/2)) \\
& +I_{c1v11v1}(t)(\sin(\omega_1 t - 18\pi/12) + \sin(\omega_1 t - 18\pi/12 + \pi) \\
& \quad -\sin(\omega_1 t - 18\pi/12 + \pi/2) \\
& \quad -\sin(\omega_1 t - 18\pi/12 + 3\pi/2)) \\
& +I_{c1v11v11}(t)(\sin(\omega_1 t - 20\pi/12) + \sin(\omega_1 t - 20\pi/12 + \pi) \\
& \quad -\sin(\omega_1 t - 20\pi/12 + \pi/2) \\
& \quad -\sin(\omega_1 t - 20\pi/12 + 3\pi/2)) \\
& +I_{c1v11v111}(t)(\sin(\omega_1 t - 22\pi/12) + \sin(\omega_1 t - 22\pi/12 + \pi) \\
& \quad -\sin(\omega_1 t - 22\pi/12 + \pi/2) \\
& \quad -\sin(\omega_1 t - 22\pi/12 + 3\pi/2)) \\
& = 4\mu n \operatorname{Im}_1 (I_{ca}(t)\sin(2\omega_1 t) + I_{cb}(t)\sin(2\omega_1 t - 2\pi/3) \\
& \quad + I_{cc}(t)\sin(2\omega_1 t - 4\pi/3)) \quad \cdots (34)
\end{aligned}$$

となり、3相交流で内側回転磁界を作ったときの (26) 式  
と変わらない。

【0 1 1 2】

【0 1 1 1】一方、 $f_2$ を計算してみると、次のようにな

$$\begin{aligned}
f_2 &= \operatorname{Im}_2 \times B(\theta = \omega_2 t + \alpha) - \operatorname{Im}_2 \times B(\theta = \omega_2 t + \pi + \alpha) \\
&= \mu \operatorname{Im}_2 (\operatorname{Im}_1 \sin(2\omega_1 t - 2\omega_2 t - 2\alpha) - \operatorname{Im}_1 \sin(2\omega_1 t - 2\omega_2 t - 2\alpha - 2\pi) \\
& \quad + \operatorname{Im}_2 \sin(2\omega_2 t + 2\alpha - 2\omega_2 t - 2\alpha) - \operatorname{Im}_2 \sin(2\omega_2 t + 2\alpha - 2\omega_2 t - 2\alpha - 2\pi) \\
& \quad + n(I_{ca}(t)\sin(2\omega_2 t + 2\alpha) + I_{cb}(t)\sin(2\omega_2 t + 2\alpha - 2\pi/3) \\
& \quad + I_{cc}(t)\sin(2\omega_2 t + 2\alpha - 4\pi/3) \\
& \quad - n(I_{ca}(t)\sin(2\omega_2 t + 2\pi + 2\alpha) + I_{cb}(t)\sin(2\omega_2 t + 2\pi + 2\alpha - 2\pi/3) \\
& \quad + I_{cc}(t)\sin(2\omega_2 t + 2\pi + 2\alpha - 4\pi/3) \\
& \quad + n(I_{c1}(t)(\sin(\omega_2 t + \alpha) - \sin(\omega_2 t + \pi + \alpha)) \\
& \quad + I_{c11}(t)(\sin(\omega_2 t + \alpha - 2\pi/12) - \sin(\omega_2 t + \pi + \alpha - 2\pi/12)) \\
& \quad + I_{c111}(t)(\sin(\omega_2 t + \alpha - 4\pi/12) - \sin(\omega_2 t + \pi + \alpha - 4\pi/12)) \\
& \quad + I_{c11v}(t)(\sin(\omega_2 t + \alpha - 6\pi/12) - \sin(\omega_2 t + \pi + \alpha - 6\pi/12))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +I_{Cv}(t)(\sin(\omega_2 t + \alpha - 8\pi/12) - \sin(\omega_2 t + \pi + \alpha - 8\pi/12)) \\
& +I_{Cv1}(t)(\sin(\omega_2 t + \alpha - 10\pi/12) - \sin(\omega_2 t + \pi + \alpha - 10\pi/12)) \\
& +I_{Cv11}(t)(\sin(\omega_2 t + \alpha - 12\pi/12) - \sin(\omega_2 t + \pi + \alpha - 12\pi/12)) \\
& +I_{Cv111}(t)(\sin(\omega_2 t + \alpha - 14\pi/12) - \sin(\omega_2 t + \pi + \alpha - 14\pi/12)) \\
& +I_{Cx}(t)(\sin(\omega_2 t + \alpha - 16\pi/12) - \sin(\omega_2 t + \pi + \alpha - 16\pi/12)) \\
& +I_{Cx1}(t)(\sin(\omega_2 t + \alpha - 18\pi/12) - \sin(\omega_2 t + \pi + \alpha - 18\pi/12)) \\
& +I_{Cx11}(t)(\sin(\omega_2 t + \alpha - 20\pi/12) - \sin(\omega_2 t + \pi + \alpha - 20\pi/12)) \\
& +I_{Cx111}(t)(\sin(\omega_2 t + \alpha - 22\pi/12) - \sin(\omega_2 t + \pi + \alpha - 22\pi/12)) \\
= & 2\mu I_{m2} n (I_{C1}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha) \\
& +I_{C11}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 2\pi/12) \\
& +I_{C111}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 4\pi/12) \\
& +I_{C1v}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 6\pi/12) \\
& +I_{Cv}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 8\pi/12) \\
& +I_{Cv1}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 10\pi/12) \\
& +I_{Cv11}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 12\pi/12) \\
& +I_{Cv111}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 14\pi/12) \\
& +I_{Cx}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 16\pi/12) \\
& +I_{Cx1}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 18\pi/12) \\
& +I_{Cx11}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 20\pi/12) \\
& +I_{Cx111}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 22\pi/12)) \quad \dots(35)
\end{aligned}$$

〈2-6-2〉内側回転磁界を与える場合

上記の12相交流 $I_{C1}(t) \sim I_{Cx11}(t)$ を

$$\begin{aligned}
I_{C1}(t) &= I_{C2}(t) \cos(\omega_2 t - \gamma) & \dots(36a) \\
I_{C11}(t) &= I_{C2}(t) \cos(\omega_2 t - \gamma - 2\pi/12) & \dots(36b) \\
I_{C111}(t) &= I_{C2}(t) \cos(\omega_2 t - \gamma - 4\pi/12) & \dots(36c) \\
I_{C1v}(t) &= I_{C2}(t) \cos(\omega_2 t - \gamma - 6\pi/12) & \dots(36d) \\
I_{Cv}(t) &= I_{C2}(t) \cos(\omega_2 t - \gamma - 8\pi/12) & \dots(36e) \\
I_{Cv1}(t) &= I_{C2}(t) \cos(\omega_2 t - \gamma - 10\pi/12) & \dots(36f) \\
I_{Cv11}(t) &= I_{C2}(t) \cos(\omega_2 t - \gamma - 12\pi/12) & \dots(36g) \\
I_{Cv111}(t) &= I_{C2}(t) \cos(\omega_2 t - \gamma - 14\pi/12) & \dots(36h) \\
I_{Cx}(t) &= I_{C2}(t) \cos(\omega_2 t - \gamma - 16\pi/12) & \dots(36i) \\
I_{Cx1}(t) &= I_{C2}(t) \cos(\omega_2 t - \gamma - 18\pi/12) & \dots(36j) \\
I_{Cx11}(t) &= I_{C2}(t) \cos(\omega_2 t - \gamma - 20\pi/12) & \dots(36k) \\
I_{Cx111}(t) &= I_{C2}(t) \cos(\omega_2 t - \gamma - 22\pi/12) & \dots(36l)
\end{aligned}$$

とおく。

を計算する。

【0 1 1 3】(36a)式～(36l)式を(35)式に代入して、 $f_2$

【0 1 1 4】

$$\begin{aligned}
f_2 = & 2\mu I_{m2} n I_{C2}(t) (\cos(\omega_2 t - \gamma) \sin(\omega_2 t + \alpha) \\
& +\cos(\omega_2 t - \gamma - 2\pi/12) \sin(\omega_2 t + \alpha - 2\pi/12) \\
& +\cos(\omega_2 t - \gamma - 4\pi/12) \sin(\omega_2 t + \alpha - 4\pi/12) \\
& +\cos(\omega_2 t - \gamma - 6\pi/12) \sin(\omega_2 t + \alpha - 6\pi/12) \\
& +\cos(\omega_2 t - \gamma - 8\pi/12) \sin(\omega_2 t + \alpha - 8\pi/12) \\
& +\cos(\omega_2 t - \gamma - 10\pi/12) \sin(\omega_2 t + \alpha - 10\pi/12) \\
& +\cos(\omega_2 t - \gamma - 12\pi/12) \sin(\omega_2 t + \alpha - 12\pi/12) \\
& +\cos(\omega_2 t - \gamma - 14\pi/12) \sin(\omega_2 t + \alpha - 14\pi/12) \\
& +\cos(\omega_2 t - \gamma - 16\pi/12) \sin(\omega_2 t + \alpha - 16\pi/12) \\
& +\cos(\omega_2 t - \gamma - 18\pi/12) \sin(\omega_2 t + \alpha - 18\pi/12) \\
& +\cos(\omega_2 t - \gamma - 20\pi/12) \sin(\omega_2 t + \alpha - 20\pi/12) \\
& +\cos(\omega_2 t - \gamma - 22\pi/12) \sin(\omega_2 t + \alpha - 22\pi/12))
\end{aligned}$$

ここで、 $\cos(a)\sin(b) = 1/2(\sin(a+b) - \sin(a-b))$ の公式を用いて

$$\begin{aligned}
f_2 = & 2\mu I_{m2} n I_{C2}(t) (1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma + \omega_2 t + \alpha) \\
& -\sin(\omega_2 t - \gamma - \omega_2 t - \alpha))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma - 2\pi/12 + \omega_2 t + \alpha - 2\pi/12) \\
& \quad - \sin(\omega_2 t - \gamma - 2\pi/12 - \omega_2 t - \alpha + 2\pi/12)) \\
& +1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma - 4\pi/12 + \omega_2 t + \alpha - 4\pi/12) \\
& \quad - \sin(\omega_2 t - \gamma - 4\pi/12 - \omega_2 t - \alpha + 4\pi/12)) \\
& +1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma - 6\pi/12 + \omega_2 t + \alpha - 6\pi/12) \\
& \quad - \sin(\omega_2 t - \gamma - 6\pi/12 - \omega_2 t - \alpha + 6\pi/12)) \\
& +1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma - 8\pi/12 + \omega_2 t + \alpha - 8\pi/12) \\
& \quad - \sin(\omega_2 t - \gamma - 8\pi/12 - \omega_2 t - \alpha + 8\pi/12)) \\
& +1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma - 10\pi/12 + \omega_2 t + \alpha - 10\pi/12) \\
& \quad - \sin(\omega_2 t - \gamma - 10\pi/12 - \omega_2 t - \alpha + 10\pi/12)) \\
& +1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma - 12\pi/12 + \omega_2 t + \alpha - 12\pi/12) \\
& \quad - \sin(\omega_2 t - \gamma - 12\pi/12 - \omega_2 t - \alpha + 12\pi/12)) \\
& +1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma - 14\pi/12 + \omega_2 t + \alpha - 14\pi/12) \\
& \quad - \sin(\omega_2 t - \gamma - 14\pi/12 - \omega_2 t - \alpha + 14\pi/12)) \\
& +1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma - 16\pi/12 + \omega_2 t + \alpha - 16\pi/12) \\
& \quad - \sin(\omega_2 t - \gamma - 16\pi/12 - \omega_2 t - \alpha + 16\pi/12)) \\
& +1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma - 18\pi/12 + \omega_2 t + \alpha - 18\pi/12) \\
& \quad - \sin(\omega_2 t - \gamma - 18\pi/12 - \omega_2 t - \alpha + 18\pi/12)) \\
& +1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma - 20\pi/12 + \omega_2 t + \alpha - 20\pi/12) \\
& \quad - \sin(\omega_2 t - \gamma - 20\pi/12 - \omega_2 t - \alpha + 20\pi/12)) \\
& +1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma - 22\pi/12 + \omega_2 t + \alpha - 22\pi/12) \\
& \quad - \sin(\omega_2 t - \gamma - 22\pi/12 - \omega_2 t - \alpha + 22\pi/12)) \\
& = 2\mu \operatorname{Im}_2 n \operatorname{Ic}_2(t) (1/2(\sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha) + \sin(\gamma + \alpha)) \\
& \quad + 1/2(\sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - 4\pi/12) + \sin(\gamma + \alpha)) \\
& \quad + 1/2(\sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - 8\pi/12) + \sin(\gamma + \alpha)) \\
& \quad + 1/2(\sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - 12\pi/12) + \sin(\gamma + \alpha)) \\
& \quad + 1/2(\sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - 16\pi/12) + \sin(\gamma + \alpha)) \\
& \quad + 1/2(\sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - 20\pi/12) + \sin(\gamma + \alpha)) \\
& \quad + 1/2(\sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - 24\pi/12) + \sin(\gamma + \alpha)) \\
& \quad + 1/2(\sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - 28\pi/12) + \sin(\gamma + \alpha)) \\
& \quad + 1/2(\sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - 32\pi/12) + \sin(\gamma + \alpha)) \\
& \quad + 1/2(\sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - 36\pi/12) + \sin(\gamma + \alpha)) \\
& \quad + 1/2(\sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - 40\pi/12) + \sin(\gamma + \alpha)) \\
& \quad + 1/2(\sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - 44\pi/12) + \sin(\gamma + \alpha)) \\
& = \mu \operatorname{Im}_2 n \operatorname{Ic}_2(t) (\sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha) \\
& \quad + \sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - 4\pi/12) \\
& \quad + \sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - 8\pi/12) \\
& \quad + \sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - 12\pi/12) \\
& \quad + \sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - 16\pi/12) \\
& \quad + \sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - 20\pi/12) \\
& \quad + \sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - 24\pi/12) \\
& \quad + \sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - 28\pi/12) \\
& \quad + \sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - 32\pi/12) \\
& \quad + \sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - 36\pi/12) \\
& \quad + \sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - 40\pi/12) \\
& \quad + \sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - 44\pi/12) \\
& \quad + 12\sin(\gamma + \alpha)) \\
& = \mu \operatorname{Im}_2 n \operatorname{Ic}_2(t) (\sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha) \\
& \quad + \sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - \pi/3) \\
& \quad + \sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - 2\pi/3))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha) \\
& -\sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - \pi/3) \\
& -\sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - 2\pi/3) \\
& +\sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha) \\
& +\sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - \pi/3) \\
& +\sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - 2\pi/3) \\
& -\sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha) \\
& -\sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - \pi/3) \\
& -\sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - 2\pi/3) \\
& +12\sin(\gamma + \alpha) \\
& = 12\mu I_{m2} n I_{c2}(t) \sin(\gamma + \alpha) \quad \dots(37)
\end{aligned}$$

〈2-6-3〉まとめ

内側回転磁界を12相交流で与えた場合に得られるこの(37)式を、内側回転磁界を3相交流で与えた場合に得られる上記の(31)式と比較すると、(37)式のほうが(31)式よりも固定項(最後の項)が4倍となっている。つまり、内側磁石の駆動電流を12相の交流( $I_i \sim I_{xi}$ )とすれば、内側磁石の駆動電流を3相交流とする場合より4倍もの駆動力が得られるわけである。このことは、逆にいえば、内側磁石に同じ駆動力を発生させるのに、内側駆動

電流は3相時の1/4で済むことを意味している。

【0115】〈3〉N(3(2p)-2p)基本形

〈3-1〉図14を参照して磁極数比が3:1(たとえば外側磁石の磁極数が6、内側磁石の磁極数が2)である場合を考える。

【0116】この場合の外側と内側の各磁石に発生する磁束密度 $B_1$ 、 $B_2$ は次のようになる。

【0117】

$$B_1 = B_{m1} \sin(3\omega_1 t - 3\theta) = \mu I_{m1} \sin(3\omega_1 t - 3\theta) \quad \dots(41)$$

$$B_2 = B_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \theta) = \mu I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \theta) \quad \dots(42)$$

ステータコイルの作る回転磁場も分けて計算するため、 $B_{c1}$ 、 $B_{c2}$ を、外側と内側の各磁石用のステータコイルによる磁束密度

$$\begin{aligned}
B_{c1} = \mu n (I_{ca}(t) \sin(3\theta) + I_{cb}(t) \sin(3\theta - 2\pi/3) \\
+ I_{cc}(t) \sin(3\theta - 4\pi/3)) \quad \dots(43)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_{c2} = \mu n (I_{cd}(t) \sin(\theta) + I_{ce}(t) \sin(\theta - 2\pi/3) \\
+ I_{cf}(t) \sin(\theta - 4\pi/3)) \quad \dots(44)
\end{aligned}$$

とする。

【0119】全体の磁束密度 $B$ は次のようになる。

【0118】上記の磁束密度 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_{c1}$ 、 $B_{c2}$ の変化を図15に示す。

【0120】

$$\begin{aligned}
B &= B_1 + B_2 + B_{c1} + B_{c2} \\
&= \mu I_{m1} \sin(3\omega_1 t - 3\theta) + \mu I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \theta) \\
&\quad + \mu n (I_{ca}(t) \sin(3\theta) + I_{cb}(t) \sin(3\theta - 2\pi/3) \\
&\quad + I_{cc}(t) \sin(3\theta - 4\pi/3)) \\
&\quad + \mu n (I_{cd}(t) \sin(\theta) + I_{ce}(t) \sin(\theta - 2\pi/3) \\
&\quad + I_{cf}(t) \sin(\theta - 4\pi/3)) \quad \dots(45)
\end{aligned}$$

外側磁石 $m_1$ に作用するトルク $\tau_1$ は、直径を中心として線対称で発生するから、 $f_1$ を半周分の力とすると、 $\tau_1 = 2f_1 \times r_1$  ( $r_1$ は半径)

である。半周に3つの等価直流電流が流れるので、これら3つの電流に働く力の和が $f_1$ となる。

【0121】

$$\begin{aligned}
f_1 &= I_{m1} \times B(\theta = \omega_1 t) + I_{m1} \times B(\theta = \omega_1 t + 3\pi/2) \\
&\quad - I_{m1} \times B(\theta = \omega_1 t + \pi/3) \\
&= \mu I_{m1} (I_{m1} \sin(3\omega_1 t - 3\omega_1 t) + I_{m1} \sin(3\omega_1 t - 3\omega_1 t - 2\pi) \\
&\quad - I_{m1} \sin(3\omega_1 t - 3\omega_1 t - \pi) \\
&\quad + I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t) + I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t - 2\pi/3) \\
&\quad - I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t - \pi/3) \\
&\quad + n(I_{ca}(t) \sin(3\omega_1 t) + I_{cb}(t) \sin(3\omega_1 t - 2\pi/3) \\
&\quad + I_{cc}(t) \sin(3\omega_1 t - 4\pi/3)) \\
&\quad + n(I_{ca}(t) \sin(3\omega_1 t + 2\pi) + I_{cb}(t) \sin(3\omega_1 t + 2\pi - 2\pi/3) \\
&\quad + I_{cc}(t) \sin(3\omega_1 t + 2\pi - 4\pi/3))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -n(I_{ca}(t)\sin(3\omega_1 t + \pi) + I_{cb}(t)\sin(3\omega_1 t + \pi - 2\pi/3) \\
& \quad + I_{cc}(t)\sin(3\omega_1 t + \pi - 4\pi/3)) \\
& + n(I_{cd}(t)\sin(\omega_1 t) + I_{ce}(t)\sin(\omega_1 t - 2\pi/3) \\
& \quad + I_{cf}(t)\sin(\omega_1 t - 4\pi/3)) \\
& + n(I_{cd}(t)\sin(\omega_1 t + 2\pi/3) + I_{ce}(t)\sin(\omega_1 t + 2\pi/3 - 2\pi/3) \\
& \quad + I_{cf}(t)\sin(\omega_1 t + 2\pi/3 - 4\pi/3)) \\
& - n(I_{cd}(t)\sin(\omega_1 t + \pi/3) + I_{ce}(t)\sin(\omega_1 t + \pi/3 - 2\pi/3) \\
& \quad + I_{cf}(t)\sin(\omega_1 t + \pi/3 - 4\pi/3)) \\
& = \mu I_{m1} (n(I_{ca}(t)\sin(3\omega_1 t) + I_{cb}(t)\sin(3\omega_1 t - 2\pi/3) \\
& \quad + I_{cc}(t)\sin(3\omega_1 t - 4\pi/3)) \\
& \quad + n(I_{ca}(t)\sin(3\omega_1 t) + I_{cb}(t)\sin(3\omega_1 t - 2\pi/3) \\
& \quad + I_{cc}(t)\sin(3\omega_1 t - 4\pi/3)) \\
& \quad + n(I_{ca}(t)\sin(3\omega_1 t) + I_{cb}(t)\sin(3\omega_1 t - 2\pi/3) \\
& \quad + I_{cc}(t)\sin(3\omega_1 t - 4\pi/3)) \\
& \quad + n(I_{cd}(t)\sin(\omega_1 t) + I_{ce}(t)\sin(\omega_1 t - 2\pi/3) \\
& \quad + I_{cf}(t)\sin(\omega_1 t - 4\pi/3)) \\
& \quad + n(I_{cd}(t)\sin(\omega_1 t + 2\pi/3) + I_{ce}(t)\sin(\omega_1 t) \\
& \quad + I_{cf}(t)\sin(\omega_1 t - 2\pi/3)) \\
& \quad + n(I_{cd}(t)\sin(\omega_1 t + 4\pi/3) + I_{ce}(t)\sin(\omega_1 t + 2\pi/3) \\
& \quad + I_{cf}(t)\sin(\omega_1 t))) \\
& = \mu n I_{m1} (3(I_{ca}(t)\sin(3\omega_1 t) + I_{cb}(t)\sin(3\omega_1 t - 2\pi/3) \\
& \quad + I_{cc}(t)\sin(3\omega_1 t - 4\pi/3)) \\
& \quad + I_{cd}(t)\sin(\omega_1 t) + I_{cd}(t)\sin(\omega_1 t + 2\pi/3) \\
& \quad + I_{cd}(t)\sin(\omega_1 t + 4\pi/3) \\
& \quad + I_{ce}(t)\sin(\omega_1 t) + I_{ce}(t)\sin(\omega_1 t + 2\pi/3) \\
& \quad + I_{ce}(t)\sin(\omega_1 t + 4\pi/3) \\
& \quad + I_{cf}(t)\sin(\omega_1 t) + I_{cf}(t)\sin(\omega_1 t + 2\pi/3) \\
& \quad + I_{cf}(t)\sin(\omega_1 t + 4\pi/3)) \\
& = 3\mu I_{m1} n(I_{ca}(t)\sin(3\omega_1 t) + I_{cb}(t)\sin(3\omega_1 t - 2\pi/3) \\
& \quad + I_{cc}(t)\sin(3\omega_1 t - 4\pi/3)) \quad \cdots (46)
\end{aligned}$$

(46)式によれば、外側磁石を正弦波で近似した場合、コイルa、b、cの励磁電流によって外側磁石に作用するトルクをコントロールできることを示している。また、コイルd、e、fの励磁電流の影響を受けないことも示している。

【0122】次に、内側磁石 $m_2$ に作用するトルク $\tau_2$ も

$$\begin{aligned}
f_2 &= I_{m2} \times B(\theta = \omega_2 t + \alpha) \\
&= \mu I_{m2} (I_{m1} \sin(3\omega_1 t - 3\omega_2 t - 3\alpha) + \mu I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_2 t - \alpha) \\
& \quad + n(I_{ca}(t)\sin(3\omega_2 t + 3\alpha) + I_{cb}(t)\sin(3\omega_2 t + 3\alpha - 2\pi/3) \\
& \quad + I_{cc}(t)\sin(3\omega_2 t + 3\alpha - 4\pi/3)) \\
& \quad + n(I_{cd}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha) + I_{ce}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 2\pi/3) \\
& \quad + I_{cf}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 4\pi/3)) \\
&= \mu I_{m2} (I_{m1} \sin(3(\omega_1 - \omega_2)t - 3\alpha) \\
& \quad + n(I_{ca}(t)\sin(3\omega_2 t + 3\alpha) + I_{cb}(t)\sin(3\omega_2 t + 3\alpha - 2\pi/3) \\
& \quad + I_{cc}(t)\sin(3\omega_2 t + 3\alpha - 4\pi/3)) \\
& \quad + n(I_{cd}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha) + I_{ce}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 2\pi/3) \\
& \quad + I_{cf}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 4\pi/3)) \quad \cdots (47)
\end{aligned}$$

(47)式をみると、内側磁石の回転に対して、計算している磁場以外の影響(相対位相角度で $2\pi/3$ 、 $4\pi/3$ )があることがわかる。この影響をわかりやすくするためピーク

直径を中心として線対称で発生するから、 $f_2$ を半周分の力とすると、 $\tau_2 = 2f_2 \times r_2$ である。半周に1つの等価直流電流が流れるので、この1つの等価直流電流に働く力が $f_2$ となる。

【0123】

の時刻 $t$ のときの各外側磁石の位置を $\phi_1 = \omega t + \pi/6$ 、 $\phi_2 = \omega t + 5\pi/6$ 、 $\phi_3 = \omega t + 9\pi/6$ とする。

【0124】それぞれの影響を考えて、回転角度 $\theta$ の磁

界は、

$$\begin{aligned} B_1 &= B_{m1} (\cos(\omega_1 t + \pi/6 - \theta) + \cos(\omega_1 t + 5\pi/6 - \theta) + \cos(\omega_1 t + 9\pi/6 - \theta)) \\ &= \mu I_{m1} (\cos(\omega_1 t + \pi/6 - \theta) + \cos(\omega_1 t + 5\pi/6 - \theta) + \cos(\omega_1 t + 9\pi/6 - \theta)) \\ &= 0 \end{aligned}$$

これは120度ごとの交差角度のある磁極は内側コイル上では打ち消しあってしまうことを示している。つまり、外側磁石の磁極数は内側磁石に影響を与えない。同様に

して外側コイルの作る磁場も合計で0となる。したがって、このときの駆動力 $f_2$ は次のようになる。

【0125】

$$\begin{aligned} f_2 &= \mu I_{m2} (n(I_{cd}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha) + I_{ce}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 2\pi/3) \\ &\quad + I_{cf}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 4\pi/3))) \quad \dots(48) \end{aligned}$$

〈3-2〉外側回転磁界と内側回転磁界をともに与える場合

上記の3相交流 $I_{ca}(t)$ 、 $I_{cb}(t)$ 、 $I_{cc}(t)$ と同じく3相交流 $I_{cd}(t)$ 、 $I_{ce}(t)$ 、 $I_{cf}(t)$ を

$$I_{ca}(t) = I_{c1} \cos(3\omega_1 t - 3\beta) \quad \dots(49a)$$

$$I_{cb}(t) = I_{c1} \cos(3\omega_1 t - 3\beta - 2\pi/3) \quad \dots(49b)$$

$$I_{cc}(t) = I_{c1} \cos(3\omega_1 t - 3\beta - 4\pi/3) \quad \dots(49c)$$

$$I_{cd}(t) = I_{c2}(t) \cos(\omega_2 t - \gamma) \quad \dots(50a)$$

$$I_{ce}(t) = I_{c2}(t) \cos(\omega_2 t - \gamma - 2\pi/3) \quad \dots(50b)$$

$$I_{cf}(t) = I_{c2}(t) \cos(\omega_2 t - \gamma - 4\pi/3) \quad \dots(50c)$$

とする。

【0126】ただし、(50a)式～(50c)式では振幅変調を可能とするため、時間の関数である $I_{c2}(t)$ とおいている。

【0127】(49a)式～(49c)式を(46)式に、(49a)式～(49c)および式(50a)式～(50c)式を(47)式に代入して、 $f_1$ 、 $f_2$ を計算する。

【0128】

$$\begin{aligned} f_1 &= 3\mu I_{m1} n I_{c1} (\cos(3\omega_1 t - 3\beta)\sin(3\omega_1 t) \\ &\quad + \cos(3\omega_1 t - 3\beta - 2\pi/3)\sin(3\omega_1 t - 2\pi/3) \\ &\quad + \cos(3\omega_1 t - 3\beta - 4\pi/3)\sin(3\omega_1 t - 4\pi/3)) \\ \text{ここで、}\cos(a)\sin(b) &= 1/2(\sin(a+b) - \sin(a-b))\text{の公式を用いて} \\ f_1 &= 3\mu I_{m1} n I_{c1} (1/2(\sin(3\omega_1 t - 3\beta + 3\omega_1 t) - \sin(3\omega_1 t - 3\beta - 3\omega_1 t)) \\ &\quad + 1/2(\sin(3\omega_1 t - 3\beta - 2\pi/3 + 3\omega_1 t - 2\pi/3) \\ &\quad - \sin(3\omega_1 t - 3\beta - 2\pi/3 - 3\omega_1 t + 2\pi/3)) \\ &\quad + 1/2(\sin(3\omega_1 t - 3\beta - 4\pi/3 + 3\omega_1 t - 4\pi/3) \\ &\quad - \sin(3\omega_1 t - 3\beta - 4\pi/3 - 3\omega_1 t + 4\pi/3))) \\ &= 3/2\mu I_{m1} n I_{c1} (\sin(6\omega_1 t - 3\beta) + \sin(3\beta) \\ &\quad + \sin(6\omega_1 t - 3\beta - 4\pi/3) + \sin(3\beta) \\ &\quad + \sin(6\omega_1 t - 3\beta - 8\pi/3) + \sin(3\beta)) \\ &= 3/2\mu I_{m1} n I_{c1} (\sin(6\omega_1 t - 3\beta) + \sin(6\omega_1 t - 3\beta - 4\pi/3) \\ &\quad + \sin(6\omega_1 t - 3\beta - 8\pi/3) \\ &\quad + 3\sin(3\beta)) \\ &= 9/2\mu I_{m1} n I_{c1} \sin(3\beta) \quad \dots(51) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_2 &= \mu I_{m2} (I_{m1} \sin(3(\omega_1 - \omega_2)t - 3\alpha) \\ &\quad + n I_{c1} (\cos(3\omega_1 t - 3\beta)\sin(3\omega_2 t + 3\alpha) \\ &\quad + \cos(3\omega_1 t - 3\beta - 2\pi/3)\sin(3\omega_2 t + 3\alpha - 2\pi/3) \\ &\quad + \cos(3\omega_1 t - 3\beta - 4\pi/3)\sin(3\omega_2 t + 3\alpha - 4\pi/3)) \\ &\quad + n I_{c2}(t) (\cos(\omega_2 t - \gamma)\sin(\omega_2 t + \alpha) \\ &\quad + \cos(\omega_2 t - \gamma - 2\pi/3)\sin(\omega_2 t + \alpha - 2\pi/3) \\ &\quad + \cos(\omega_2 t - \gamma - 4\pi/3)\sin(\omega_2 t + \alpha - 4\pi/3)) \end{aligned}$$

ここで、 $\cos(a)\sin(b) = 1/2(\sin(a+b) - \sin(a-b))$ の公式を用いて

$$\begin{aligned} f_2 &= \mu I_{m2} (I_{m1} \sin(3(\omega_1 - \omega_2)t - 3\alpha) \\ &\quad + n I_{c1} (1/2(\sin(3\omega_1 t - 3\beta + 3\omega_2 t + 3\alpha) \\ &\quad - \sin(3\omega_1 t - 3\beta - 3\omega_2 t - 3\alpha)) \\ &\quad + 1/2(\sin(3\omega_1 t - 3\beta - 2\pi/3 + 3\omega_2 t + 3\alpha - 2\pi/3) \\ &\quad - \sin(3\omega_1 t - 3\beta - 2\pi/3 - 3\omega_2 t - 3\alpha + 2\pi/3)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +1/2(\sin(3\omega_1 t - 3\beta - 4\pi/3 + 3\omega_2 t + 3\alpha - 4\pi/3) \\
& \quad - \sin(3\omega_1 t - 3\beta - 4\pi/3 - 3\omega_2 t - 3\alpha + 4\pi/3)) \\
& + n I_{c2}(t) (1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma + \omega_2 t + \alpha) \\
& \quad - \sin(\omega_1 t - \gamma - \omega_2 t - \alpha)) \\
& \quad + 1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma - 2\pi/3 + \omega_2 t + \alpha - 2\pi/3) \\
& \quad - \sin(\omega_2 t - \gamma - 2\pi/3 - \omega_2 t - \alpha + 2\pi/3)) \\
& \quad + 1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma - 4\pi/3 + \omega_2 t + \alpha - 4\pi/3) \\
& \quad - \sin(\omega_2 t - \gamma - 4\pi/3 - \omega_2 t - \alpha + 4\pi/3))) \\
& = \mu I_{m2} (I_{m1} \sin(3(\omega_1 - \omega_2)t - 3\alpha) \\
& \quad + 1/2 n I_{c1} (\sin(3\omega_1 t + 3\omega_2 t - 3\beta + 3\alpha) \\
& \quad \quad + \sin(3\omega_1 t + 3\omega_2 t - 3\beta + 3\alpha - 4\pi/3) \\
& \quad \quad + \sin(3\omega_1 t + 3\omega_2 t - 3\beta + 3\alpha - 8\pi/3) \\
& \quad \quad - 3\sin(3\omega_1 t - 3\beta + 3\omega_2 t - 3\alpha)) \\
& \quad + 1/2 n I_{c2}(t) (\sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha) \\
& \quad \quad + \sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - 4\pi/3) \\
& \quad \quad + \sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - 8\pi/3) + 3\sin(\gamma + \alpha))) \\
& = \mu I_{m2} (I_{m1} \sin(3(\omega_1 - \omega_2)t - 3\alpha) \\
& \quad + 1/2 n I_{c1} (\sin(3\omega_1 t + 3\omega_2 t - 3\beta + 3\alpha) \\
& \quad \quad + \sin(3\omega_1 t + 3\omega_2 t - 3\beta + 3\alpha - 2\pi/3) \\
& \quad \quad + \sin(3\omega_1 t + 3\omega_2 t - 3\beta + 3\alpha - 4\pi/3) \\
& \quad \quad - 3\sin(3\omega_1 t - 3\beta - 3\omega_2 t - 3\alpha)) \\
& \quad + 1/2 n I_{c2}(t) (\sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha) \\
& \quad \quad + \sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - 2\pi/3) \\
& \quad \quad + \sin(2\omega_2 t - \gamma + \alpha - 4\pi/3) \\
& \quad \quad + 3\sin(\gamma + \alpha))) \\
& = \mu I_{m2} (I_{m1} \sin(3(\omega_1 - \omega_2)t - 3\alpha) \\
& \quad - 3/2 n I_{c1} \sin(3\omega_1 t - 3\beta - 3\omega_2 t - 3\alpha) \\
& \quad + 3/2 n I_{c2}(t) \sin(\gamma + \alpha)) \quad \dots (52)
\end{aligned}$$

ここで、 $f_2$ については、(48)式のところでみたように、  
外側磁石および外側コイルの作る磁界の影響がない場合

$$f_2 = 3/2 n I_{c2}(t) \sin(\gamma + \alpha) \quad \dots (53)$$

となり、一定トルクで駆動できる。

磁界の影響が残る場合は、(52)式において、

【0129】これに対して、外側磁石や外側コイルの作

$$\begin{aligned}
I_{c2}(t) &= (2/3 C / \mu I_{m2} - I_{m1} \sin(3(\omega_1 - \omega_2)t - 3\alpha) \\
& \quad + n I_{c1} \sin(3\omega_1 t - 3\beta - 3\omega_2 t - 3\alpha)) / (n \sin(\gamma + \alpha)) \\
& \quad \dots (54)
\end{aligned}$$

ただし、 $C$ ：定数

とすると、 $f_2 = C$ となり一定トルクでの駆動が可能となる。つまり、磁極数比が3:1の場合、(52)式によれば、内側磁石の回転に対して外側磁石の影響が若干発生することを意味している。より正確には位相差 $(\omega_1 - \omega_2)$ に応じた一定のトルク変動が内側磁石の回転に生じる。その様子を図16に示す。矩形波モデルとしたとき、顕著に外側磁石と内側磁石の磁力干渉の影響が表される。いま、状態Aを考えると、この状態よりも状態Bのほうが安定するため、Bの状態へ移そうとするトルクが発生する。このトルクは断続トルクとなり、位相差 $(\omega_1 - \omega_2)$ によって発生するわけである。さらに述べると、現実にはコイルの間の距離の影響を受けたり完全な正弦波が実現できないため、完全に外側磁石の影響を打

ち消すことができない場合があり、その場合の最も極端な場合がこの(52)式で表される。

【0130】しかしながら、(54)式により振幅変調を行うことで、その一定トルク変動を打ち消すことが可能となり、磁極数比が3:1の場合であっても内側磁石を一定トルクで駆動できるのである。

【0131】〈3-3〉まとめ

(51)、(52)の各式によれば、外側磁石と内側磁石のそれぞれに同期させてステータコイルに電流を流すとき、両方の磁石にそれぞれ回転トルクが発生することがわかる。計算はしなかったが、外側磁石に同期させてステータコイルに電流を流したときは外側磁石にのみ、また内側磁石に同期させてステータコイルに電流を流したときは内側磁石にのみ回転トルクが発生することはいうまで

もない。このことから、磁極数比が3:1の組み合わせであるときにも、回転電機として働くことが可能であることが証明された。

#### 【0132】〈3-4〉電流設定

図14に示した外周側と内周側のコイルとを図17に示したように共用化することを考える。図14においてコイルaとd、コイルaとf、コイルaとe、コイルaとd、コイルaとf、コイルaとeをまとめればよいから、図17と対照させると、図17においてステータコイルに流す複合電流を、

$$\begin{aligned} I_1 &= I_a + I_d & I_{10} &= I_1 = I_a + I_d \\ I_2 &= I_c & I_{11} &= I_2 = I_c \\ I_3 &= I_b & I_{12} &= I_3 = I_b \\ I_4 &= I_a + I_f & I_{13} &= I_4 = I_a + I_f \\ I_5 &= I_c & I_{14} &= I_5 = I_c \\ I_6 &= I_b & I_{15} &= I_6 = I_b \\ I_7 &= I_a + I_e & I_{16} &= I_7 = I_a + I_e \\ I_8 &= I_c & I_{17} &= I_8 = I_c \\ I_9 &= I_b & I_{18} &= I_9 = I_b \end{aligned}$$

とすればよいことがわかる。つまり、磁極数比が3:1の組み合わせでは、9相の電流で代表することができる。これは、磁極数比が2:1の組み合わせとの対比からいえば、磁極数比が3:1の組み合わせでは18相の交流としなければならないのであるが、磁極数比が3:1の組み合わ

せの場合に限り、半周で位相が反転しているため、18相の半分の9相の交流で代表することができるからである。

【0133】ただし、コイル1、4、7、1、4、7のコイルの負担が大きくなるため、残りのコイルも使用して内側回転磁界を形成させることを考えると、

$$\begin{aligned} I_1 &= I_a + I_i & I_{10} &= I_1 = I_a + I_i \\ I_2 &= I_c + I_{vi} & I_{11} &= I_2 = I_c + I_{vi} \\ I_3 &= I_b + I_{ii} & I_{12} &= I_3 = I_b + I_{ii} \\ I_4 &= I_a + I_{vii} & I_{13} &= I_4 = I_a + I_{vii} \\ I_5 &= I_c + I_{iii} & I_{14} &= I_5 = I_c + I_{iii} \\ I_6 &= I_b + I_{viii} & I_{15} &= I_6 = I_b + I_{viii} \\ I_7 &= I_a + I_{iv} & I_{16} &= I_7 = I_a + I_{iv} \\ I_8 &= I_c + I_{ix} & I_{17} &= I_8 = I_c + I_{ix} \\ I_9 &= I_b + I_v & I_{18} &= I_9 = I_b + I_v \end{aligned}$$

であればよい。

【0134】内側回転磁界を形成させるための電流 $I_i \sim I_{ix}$ 、 $I_i \sim I_{ix}$ の位置関係を図18に示す。

【0135】〈3-5〉9相交流で内側回転磁界を与える場合

〈3-5-1〉9相交流で内側回転磁界を作ることを考えると、このときの磁束密度 $B_{c2}$ は次のようになる。

#### 【0136】

$$\begin{aligned} B_{c2} &= \mu n (I_{ci}(t) \sin(\theta) + I_{cii}(t) \sin(\theta - 2\pi/9) \\ &\quad + I_{ciii}(t) \sin(\theta - 4\pi/9) \\ &\quad + I_{civ}(t) \sin(\theta - 6\pi/9) \\ &\quad + I_{cv}(t) \sin(\theta - 8\pi/9) \\ &\quad + I_{cvi}(t) \sin(\theta - 10\pi/9) \\ &\quad + I_{cvii}(t) \sin(\theta - 12\pi/9) \\ &\quad + I_{cviii}(t) \sin(\theta - 14\pi/9) \\ &\quad + I_{cix}(t) \sin(\theta - 16\pi/9)) \end{aligned} \quad \dots (55)$$

したがって、全体の磁束密度 $B$ は次のようになる。

#### 【0137】

$$\begin{aligned} B &= B_1 + B_2 + B_{c1} + B_{c2} \\ &= \mu I_{m1} \sin(3\omega_1 t - 3\theta) + \mu I_{m2} \sin(\omega_2 t + \alpha - \theta) \\ &\quad + \mu n (I_{ca}(t) \sin(3\theta) + I_{cb}(t) \sin(3\theta - 2\pi/3) \\ &\quad + I_{cc}(t) \sin(3\theta - 4\pi/3) \\ &\quad + \mu n (I_{ci}(t) \sin(\theta) + I_{cii}(t) \sin(\theta - 2\pi/9) \\ &\quad + I_{ciii}(t) \sin(\theta - 4\pi/9) \\ &\quad + I_{civ}(t) \sin(\theta - 6\pi/9) \\ &\quad + I_{cv}(t) \sin(\theta - 8\pi/9) \\ &\quad + I_{cvi}(t) \sin(\theta - 10\pi/9) \\ &\quad + I_{cvii}(t) \sin(\theta - 12\pi/9) \\ &\quad + I_{cviii}(t) \sin(\theta - 14\pi/9) \\ &\quad + I_{cix}(t) \sin(\theta - 16\pi/9)) \end{aligned} \quad \dots (56)$$

このときの $f_i$ を計算してみると、

$$\begin{aligned} f_i &= I_{m1} \times B(\theta = \omega_1 t) + I_{m1} \times B(\theta = \omega_1 t + 2\pi/3) - I_{m1} \times B(\theta = \omega_1 t + \pi/3) \\ &= \mu I_{m1} (I_{m1} (\sin(3\omega_1 t - 3\omega_1 t) + \sin(3\omega_1 t - 3\omega_1 t + 2\pi) \\ &\quad - \sin(3\omega_1 t - 3\omega_1 t + \pi)) \\ &\quad + I_{m2} (\sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t) + \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t - 2\pi/3)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t + \pi/3) \\
& +n(I_{ca}(t)(\sin(3\omega_1 t) + \sin(3\omega_1 t + 2\pi) \\
& \quad -\sin(3\omega_1 t + \pi)) \\
& +I_{cb}(t)(\sin(3\omega_1 t - 2\pi/3) + \sin(3\omega_1 t + 2\pi - 2\pi/3) \\
& \quad -\sin(3\omega_1 t + \pi - 2\pi/3)) \\
& +I_{cc}(t)(\sin(3\omega_1 t - 4\pi/3) + \sin(3\omega_1 t + 2\pi - 4\pi/3) \\
& \quad -\sin(3\omega_1 t + \pi - 4\pi/3))) \\
& +n(I_{c1}(t)(\sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_1 t + 2\pi/3) \\
& \quad +\sin(\omega_1 t + \pi/3)) \\
& +I_{c11}(t)(\sin(\omega_1 t - 2\pi/9) + \sin(\omega_1 t - 2\pi/9 + 2\pi/3)) \\
& \quad +\sin(\omega_1 t - 2\pi/9 + \pi/3)) \\
& +I_{c111}(t)(\sin(\omega_1 t - 4\pi/9) + \sin(\omega_1 t - 4\pi/9 + 2\pi/3)) \\
& \quad +\sin(\omega_1 t - 4\pi/9 + \pi/3)) \\
& +I_{c1v}(t)(\sin(\omega_1 t - 6\pi/9) + \sin(\omega_1 t - 6\pi/9 + 2\pi/3) \\
& \quad +\sin(\omega_1 t - 6\pi/9 + \pi/3)) \\
& +I_{cv}(t)(\sin(\omega_1 t - 8\pi/9) + \sin(\omega_1 t - 8\pi/9 + 2\pi/3) \\
& \quad +\sin(\omega_1 t - 8\pi/9 + \pi/3)) \\
& +I_{cv1}(t)(\sin(\omega_1 t - 10\pi/9) + \sin(\omega_1 t - 10\pi/9 + 2\pi/3)) \\
& \quad +\sin(\omega_1 t - 10\pi/9 + \pi/3)) \\
& +I_{cv11}(t)(\sin(\omega_1 t - 12\pi/9) + \sin(\omega_1 t - 12\pi/9 + 2\pi/3) \\
& \quad +\sin(\omega_1 t - 12\pi/9 + \pi/3)) \\
& +I_{cv111}(t)(\sin(\omega_1 t - 14\pi/9) + \sin(\omega_1 t - 14\pi/9 + 2\pi/3) \\
& \quad +\sin(\omega_1 t - 14\pi/9 + \pi/3)) \\
& +I_{cix}(t)(\sin(\omega_1 t - 16\pi/9) + \sin(\omega_1 t - 16\pi/9 + 2\pi/3) \\
& \quad +\sin(\omega_1 t - 16\pi/9 + \pi/3))) \\
& = \mu I_{m1} ( \\
& I_{m1}(\sin(3\omega_1 t - 3\omega_1 t) + \sin(3\omega_1 t - 3\omega_1 t + 2\pi) - \sin(3\omega_1 t - 3\omega_1 t + \pi)) \\
& \quad (=0) \\
& +I_{m2}(\sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t) + \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t - 2\pi/3) - \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_1 t + \pi/3) \\
& \quad (=0) \\
& +n(I_{ca}(t)(\sin(3\omega_1 t) + \sin(3\omega_1 t + 2\pi) - \sin(3\omega_1 t + \pi)) \\
& +I_{cb}(t)(\sin(3\omega_1 t - 2\pi/3) + \sin(3\omega_1 t + 2\pi - 2\pi/3) - \sin(3\omega_1 t + \pi - 2\pi/3)) \\
& +I_{cc}(t)(\sin(3\omega_1 t - 4\pi/3) + \sin(3\omega_1 t + 2\pi - 4\pi/3) - \sin(3\omega_1 t + \pi - 4\pi/3))) \\
& +n(I_{c1}(t)(\sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_1 t + 2\pi/3) + \sin(\omega_1 t + \pi/3)) \quad (=0) \\
& +I_{c11}(t)(\sin(\omega_1 t - 2\pi/9) + \sin(\omega_1 t - 2\pi/9 + 2\pi/3) + \sin(\omega_1 t - 2\pi/9 + \pi/3)) \\
& \quad (=0) \\
& +I_{c111}(t)(\sin(\omega_1 t - 4\pi/9) + \sin(\omega_1 t - 4\pi/9 + 2\pi/3) + \sin(\omega_1 t - 4\pi/9 + \pi/3)) \\
& \quad (=0) \\
& +I_{c1v}(t)(\sin(\omega_1 t - 6\pi/9) + \sin(\omega_1 t - 6\pi/9 + 2\pi/3) + \sin(\omega_1 t - 6\pi/9 + \pi/3)) \\
& \quad (=0) \\
& +I_{cv}(t)(\sin(\omega_1 t - 8\pi/9) + \sin(\omega_1 t - 8\pi/9 + 2\pi/3) + \sin(\omega_1 t - 8\pi/9 + \pi/3)) \\
& \quad (=0) \\
& +I_{cv1}(t)(\sin(\omega_1 t - 10\pi/9) + \sin(\omega_1 t - 10\pi/9 + 2\pi/3) \\
& \quad +\sin(\omega_1 t - 10\pi/9 + \pi/3)) \\
& \quad (=0) \\
& +I_{cv11}(t)(\sin(\omega_1 t - 12\pi/9) + \sin(\omega_1 t - 12\pi/9 + 2\pi/3) \\
& \quad +\sin(\omega_1 t - 12\pi/9 + \pi/3)) \\
& \quad (=0) \\
& +I_{cv111}(t)(\sin(\omega_1 t - 14\pi/9) + \sin(\omega_1 t - 14\pi/9 + 2\pi/3) \\
& \quad +\sin(\omega_1 t - 14\pi/9 + \pi/3))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & +I_{c1x}(t)(\sin(\omega_1 t - 16\pi/9) + \sin(\omega_1 t - 16\pi/9 + 2\pi/3) \\
 & \quad + \sin(\omega_1 t - 16\pi/9 + \pi/3)) \\
 & = 3\mu n \operatorname{Im}_1 (I_{ca}(t)\sin(3\omega_1 t) + I_{cb}(t)\sin(3\omega_1 t - 2\pi/3) \\
 & \quad + I_{cx}(t)\sin(3\omega_1 t - 4\pi/3)) \quad \dots (57)
 \end{aligned}$$

となり、内側回転磁界を3相交流で与えた場合に得られる。  
 上記 (46) 式と変わらない。

【0 1 3 9】

【0 1 3 8】一方、 $f_2$ を計算してみると、次のようにな

$$\begin{aligned}
 f_2 &= \operatorname{Im}_2 \times B(\theta = \omega_2 t + \alpha) \\
 &= \mu \operatorname{Im}_2 (\operatorname{Im}_1 \sin(3\omega_1 t - 3\omega_2 t - 3\alpha) + \operatorname{Im}_2 \sin(\omega_2 t + \alpha - \omega_2 t - \alpha) \\
 & \quad + n(I_{ca}(t)\sin(3\omega_2 t + 3\alpha) + I_{cb}(t)\sin(3\omega_2 t + 3\alpha - 2\pi/3) \\
 & \quad + I_{cc}(t)\sin(3\omega_2 t + 3\alpha - 4\pi/3) \\
 & \quad + n(I_{c1}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha) \\
 & \quad + I_{c11}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 2\pi/9) \\
 & \quad + I_{c111}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 4\pi/9) \\
 & \quad + I_{c1v}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 6\pi/9) \\
 & \quad + I_{c1v1}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 8\pi/9) \\
 & \quad + I_{c1v11}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 10\pi/9) \\
 & \quad + I_{c1v111}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 12\pi/9) \\
 & \quad + I_{c1x}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 16\pi/9))) \\
 &= \mu \operatorname{Im}_2 (\operatorname{Im}_1 \sin(3\omega_1 t - 3\omega_2 t - 3\alpha) \\
 & \quad + n(I_{ca}(t)\sin(3\omega_2 t + 3\alpha) + I_{cb}(t)\sin(3\omega_2 t + 3\alpha - 2\pi/3) \\
 & \quad + I_{cc}(t)\sin(3\omega_2 t + 3\alpha - 4\pi/3) \\
 & \quad + n(I_{c1}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha) \\
 & \quad + I_{c11}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 2\pi/9) \\
 & \quad + I_{c111}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 4\pi/9) \\
 & \quad + I_{c1v}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 6\pi/9) \\
 & \quad + I_{c1v1}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 8\pi/9) \\
 & \quad + I_{c1v11}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 10\pi/9) \\
 & \quad + I_{c1v111}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 12\pi/9) \\
 & \quad + I_{c1x}(t)\sin(\omega_2 t + \alpha - 16\pi/9))) \quad \dots (58)
 \end{aligned}$$

〈3-5-2〉 外側回転磁界と内側回転磁界をとともに与える  
 場合

上記の3相交流 $I_{ca}(t)$ 、 $I_{cb}(t)$ 、 $I_{cc}(t)$ は

$$I_{ca}(t) = I_{c1} \cos(3\omega_1 t - 3\beta) \quad \dots (59a)$$

$$I_{cb}(t) = I_{c1} \cos(3\omega_1 t - 3\beta - 2\pi/3) \quad \dots (59b)$$

$$I_{cc}(t) = I_{c1} \cos(3\omega_1 t - 3\beta - 4\pi/3) \quad \dots (59c)$$

であり、上記の9相交流 $I_{c1}(t) \sim I_{c1x}(t)$ を

$$I_{c1}(t) = I_{c2}(t) \cos(\omega_2 t - \gamma) \quad \dots (60a)$$

$$I_{c11}(t) = I_{c2}(t) \cos(\omega_2 t - \gamma - 2\pi/9) \quad \dots (60b)$$

$$I_{c111}(t) = I_{c2}(t) \cos(\omega_2 t - \gamma - 4\pi/9) \quad \dots (60c)$$

$$I_{c1v}(t) = I_{c2}(t) \cos(\omega_2 t - \gamma - 6\pi/9) \quad \dots (60d)$$

$$I_{c1v1}(t) = I_{c2}(t) \cos(\omega_2 t - \gamma - 8\pi/9) \quad \dots (60e)$$

$$I_{c1v11}(t) = I_{c2}(t) \cos(\omega_2 t - \gamma - 10\pi/9) \quad \dots (60f)$$

$$I_{c1v111}(t) = I_{c2}(t) \cos(\omega_2 t - \gamma - 12\pi/9) \quad \dots (60g)$$

$$I_{c1x}(t) = I_{c2}(t) \cos(\omega_2 t - \gamma - 14\pi/9) \quad \dots (60h)$$

$$I_{c1x}(t) = I_{c2}(t) \cos(\omega_2 t - \gamma - 16\pi/9) \quad \dots (60i)$$

とおく。

を(58)式に代入して、 $f_2$ を計算する。

【0 1 4 0】(59a)式～(59c)および式(60a)式～(60i)式

【0 1 4 1】

$$\begin{aligned}
 f_2 = & \mu \operatorname{Im}_2 (\operatorname{Im}_1 \sin(3\omega_1 t - 3\omega_2 t - 3\alpha) \\
 & + n(\operatorname{Ic}_1 \cos(3\omega_1 t - 3\beta) \sin(3\omega_2 t - 3\alpha) \\
 & + \operatorname{Ic}_1 \cos(3\omega_1 t - 3\beta - 2\pi/3) \sin(3\omega_2 t + 3\alpha - 2\pi/3) \\
 & + \operatorname{Ic}_1 \cos(3\omega_1 t - 3\beta - 4\pi/3) \sin(3\omega_2 t + 3\alpha - 4\pi/3) \\
 & + n(\operatorname{Ic}_2(t) \cos(\omega_2 t - \gamma) \sin(\omega_1 t + \alpha) \\
 & + \operatorname{Ic}_2(t) \cos(\omega_2 t - \gamma - 2\pi/9) \sin(\omega_1 t + \alpha - 2\pi/9) \\
 & + \operatorname{Ic}_2(t) \cos(\omega_2 t - \gamma - 4\pi/9) \sin(\omega_1 t + \alpha - 4\pi/9) \\
 & + \operatorname{Ic}_2(t) \cos(\omega_2 t - \gamma - 6\pi/9) \sin(\omega_1 t + \alpha - 6\pi/9) \\
 & + \operatorname{Ic}_2(t) \cos(\omega_2 t - \gamma - 8\pi/9) \sin(\omega_1 t + \alpha - 8\pi/9) \\
 & + \operatorname{Ic}_2(t) \cos(\omega_2 t - \gamma - 10\pi/9) \sin(\omega_1 t + \alpha - 10\pi/9) \\
 & + \operatorname{Ic}_2(t) \cos(\omega_2 t - \gamma - 12\pi/9) \sin(\omega_1 t + \alpha - 12\pi/9) \\
 & + \operatorname{Ic}_2(t) \cos(\omega_2 t - \gamma - 14\pi/9) \sin(\omega_1 t + \alpha - 14\pi/9) \\
 & + \operatorname{Ic}_2(t) \cos(\omega_2 t - \gamma - 16\pi/9) \sin(\omega_1 t + \alpha - 16\pi/9)))
 \end{aligned}$$

ここで、 $\cos(a)\sin(b) = 1/2(\sin(a+b) - \sin(a-b))$ の公式を用いて

$$\begin{aligned}
 f_2 = & \mu \operatorname{Im}_2 (\operatorname{Im}_1 \sin(3\omega_1 t - 3\omega_2 t - 3\alpha) \\
 & + n \operatorname{Ic}_1 (1/2(\sin(3\omega_1 t - 3\beta + 3\omega_2 t + 3\alpha) \\
 & \quad - \sin(3\omega_1 t - 3\beta - 3\omega_2 t - 3\alpha) \\
 & \quad + 1/2(\sin(3\omega_1 t - 3\beta - 2\pi/3 + 3\omega_2 t + 3\alpha - 2\pi/3) \\
 & \quad - \sin(3\omega_1 t - 3\beta - 2\pi/3 - 3\omega_2 t - 3\alpha + 2\pi/3)) \\
 & \quad + 1/2(\sin(3\omega_1 t - 3\beta - 4\pi/3 + 3\omega_2 t + 3\alpha - 4\pi/3) \\
 & \quad - \sin(3\omega_1 t - 3\beta - 4\pi/3 - 3\omega_2 t - 3\alpha + 4\pi/3))) \\
 & + n \operatorname{Ic}_2(t) (1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma + \omega_2 t + \alpha) \\
 & \quad - \sin(\omega_2 t - \gamma - \omega_2 t - \alpha)) \\
 & \quad + 1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma - 2\pi/9 + \omega_2 t + \alpha) \\
 & \quad - \sin(\omega_2 t - \gamma - 2\pi/9 - \omega_2 t - \alpha)) \\
 & \quad + 1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma - 4\pi/9 + \omega_2 t + \alpha) \\
 & \quad - \sin(\omega_2 t - \gamma - 4\pi/9 - \omega_2 t - \alpha)) \\
 & \quad + 1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma - 8\pi/9 + \omega_2 t + \alpha) \\
 & \quad - \sin(\omega_2 t - \gamma - 8\pi/9 - \omega_2 t - \alpha)) \\
 & \quad + 1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma - 10\pi/9 + \omega_2 t + \alpha) \\
 & \quad - \sin(\omega_2 t - \gamma - 10\pi/9 - \omega_2 t - \alpha)) \\
 & \quad + 1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma - 12\pi/9 + \omega_2 t + \alpha) \\
 & \quad - \sin(\omega_2 t - \gamma - 12\pi/9 - \omega_2 t - \alpha)) \\
 & \quad + 1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma - 14\pi/9 + \omega_2 t + \alpha) \\
 & \quad - \sin(\omega_2 t - \gamma - 14\pi/9 - \omega_2 t - \alpha)) \\
 & \quad + 1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma - 16\pi/9 + \omega_2 t + \alpha) \\
 & \quad - \sin(\omega_2 t - \gamma - 16\pi/9 - \omega_2 t - \alpha)))
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 = & \mu \operatorname{Im}_2 (\operatorname{Im}_1 \sin(3\omega_1 t - 3\omega_2 t - 3\alpha) \\
 & + 1/2n \operatorname{Ic}_1 (\sin(3\omega_1 t + 3\omega_2 t - 3\beta + 3\alpha) \\
 & \quad - \sin(3\omega_1 t - 3\omega_2 t - 3\alpha - 3\beta) \\
 & \quad + \sin(3\omega_1 t + 3\omega_2 t - 3\beta + 3\alpha - 4\pi/3) \\
 & \quad - \sin(3\omega_1 t - 3\omega_2 t - 3\alpha - 3\beta) \\
 & \quad + \sin(3\omega_1 t + 3\omega_2 t - 3\beta + 3\alpha - 2\pi/3) \\
 & \quad - \sin(3\omega_1 t - 3\omega_2 t - 3\alpha - 3\beta)) \\
 & + n \operatorname{Ic}_2(t) (1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma + \omega_2 t + \alpha) + \sin(\gamma + \alpha)) \\
 & \quad + 1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma + \omega_2 t + \alpha - 4\pi/9) + \sin(\gamma + \alpha)) \\
 & \quad + 1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma + \omega_2 t + \alpha - 8\pi/9) + \sin(\gamma + \alpha)) \\
 & \quad + 1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma + \omega_2 t + \alpha - 12\pi/9) + \sin(\gamma + \alpha))
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma + \omega_2 t + \alpha - 16\pi/9) + \sin(\gamma + \alpha)) \\
& +1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma + \omega_2 t + \alpha - 2\pi/9) + \sin(\gamma + \alpha)) \\
& +1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma + \omega_2 t + \alpha - 6\pi/9) + \sin(\gamma + \alpha)) \\
& +1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma + \omega_2 t + \alpha - 10\pi/9) + \sin(\gamma + \alpha)) \\
& +1/2(\sin(\omega_2 t - \gamma + \omega_2 t + \alpha - 14\pi/9) + \sin(\gamma + \alpha))) \\
= & \mu I_m (I_{m1} \sin(3\omega_1 t - 3\omega_2 t - 3\alpha) \\
& - 3/2 n I_{c1} \sin(3\omega_1 t + 3\omega_2 t - 3\alpha - 3\beta) \\
& + 9/2 n I_{c2}(t) \sin(\gamma + \alpha)) \quad \dots (61)
\end{aligned}$$

### 〈3-5-3〉 まとめ

(61)式右辺の第1項、第2項は、(48)式のところでみたように、他相の分を考慮すると打ち消されることになるのは、3相交流の場合と同じである。

【0142】一方、内側回転磁界を9相交流で与えた場合に得られるこの(61)式を、内側回転磁界を3相交流で与えた場合に得られる上記の(52)式と比較すると、(61)式のほうが(52)式よりも固定項(最後の項)が3倍となっている。つまり、内側磁石の駆動電流を9相の交流( $I_1 \sim I_9$ )とすれば、内側磁石の駆動電流を3相交流とする場合より3倍もの電磁力(駆動トルク)が得られるわけである。このことは、逆にいえば、内側磁石に同じ駆動トルクを発生させるのに、駆動電流は1/3でよいことを意味している。

【0143】これで、理論的な解析を終える。

【0144】次に、図19～図25に第5から第11までの各実施形態を示す。これらも前述の4つの実施形態と同様に、ステータの内と外にロータ3、4を配置したものである。ただし、図19、図20は磁極数比が2:1、図21は磁極数比が2:3、図22は磁極数比が4:3、図23、図25は磁極数比が2:1、図24は磁極数比が9:1の組み合わせのものである。まとめると、外側磁石の磁極数が内側磁石の磁極数より多い場合に限らず、外側磁石の磁極数が内側磁石の磁極数より少ない場合でもかまわない。また、ロータは第1から第4までの各実施形態で説明した一周分を展開して複数個を連結し、円筒状に構成しても、展開する前のものと同様に扱うことができる。

【0145】また、ステータと2つのロータの並び方は基本的にどんな並び方でもかまわない。たとえば、図26は、ステータ41の内側に中間ロータ42と内ロータ43の2つのロータを配置したものである。この場合、中間ロータ42を外枠44と同じに鉄枠で覆ったのでは、ステータ41に発生する磁束が内ロータ43まで届かなくなるので、中間ロータ42を鉄枠で覆うことはしない。図示しないが、ステータの外側に2つのロータを配置したときも同様である。このように、ステータを最も外側か最も内側に配置したときのメリットは、ステータのコイルを冷やす必要がある場合に冷却が容易になる点にある。

【0146】実施形態では、2つのロータを永久磁石で構成する場合で説明したが、各ロータを電磁石で構成することができることはいうまでもない。

【0147】モータ駆動電流回路はPWM信号を用いる場合に限らず、PAM信号その他の信号を用いる場合でもかまわない。

【0148】実施形態では、電機の構造がラジアルギャップ型(径方向にロータとステータの空隙がある)のものについて述べたが、アキシアルギャップ型(軸方向にロータとステータの空隙がある)のものについても本発明を適用できる。

### 【図面の簡単な説明】

【図1】第1実施形態の回転電機本体の概略断面図。

【図2】ステータ2の内周側と外周側に専用コイルを配置した回転電機本体の概略断面図。

【図3】制御システム図。

【図4】インバータの回路図。

【図5】第2実施形態の回転電機本体の概略断面図。

【図6】第3実施形態の回転電機本体の概略断面図。

【図7】第4実施形態の回転電機本体の概略断面図。

【図8】N(2p-2p)基本形を考えるのに参照するモデル図。

【図9】磁束密度の変化を示すモデル図。

【図10】N(2(2p)-2p)基本形を考えるのに参照するモデル図。

【図11】磁束密度の変化を示すモデル図。

【図12】N(2(2p)-2p)基本形を考えるのに参照するモデル図。

【図13】12相交流の分布を示す波形図。

【図14】N(3(2p)-2p)基本形を考えるのに参照するモデル図。

【図15】磁束密度の変化を示すモデル図。

【図16】外側磁石と内側磁石の磁力干渉の説明図。

【図17】N(3(2p)-2p)基本形を考えるのに参照するモデル図。

【図18】9相交流の分布を示す波形図。

【図19】第5実施形態の回転電機本体の概略断面図。

【図20】第6実施形態の回転電機本体の概略断面図。

【図21】第7実施形態の回転電機本体の概略断面図。

【図22】第8実施形態の回転電機本体の概略断面図。

【図23】第9実施形態の回転電機本体の概略断面図。

【図24】第10実施形態の回転電機本体の概略断面図。

【図25】第11実施形態の回転電機本体の概略断面図。

【図26】第12実施形態の回転電機本体の概略断面図。

【符号の説明】

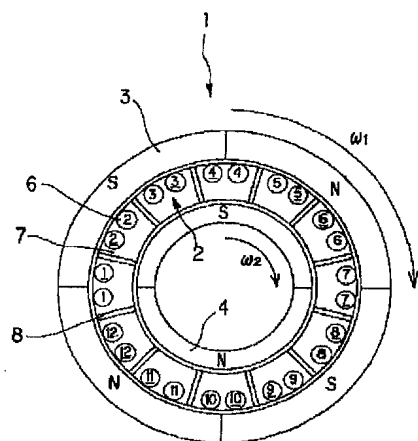
2 ステータ

3 外側ロータ

4 内側ロータ

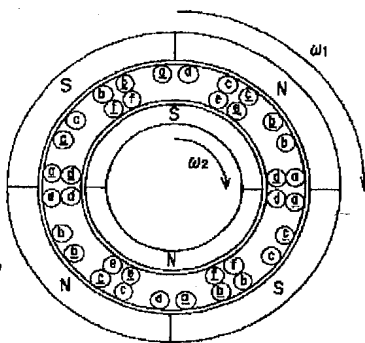
6 コイル

【図1】

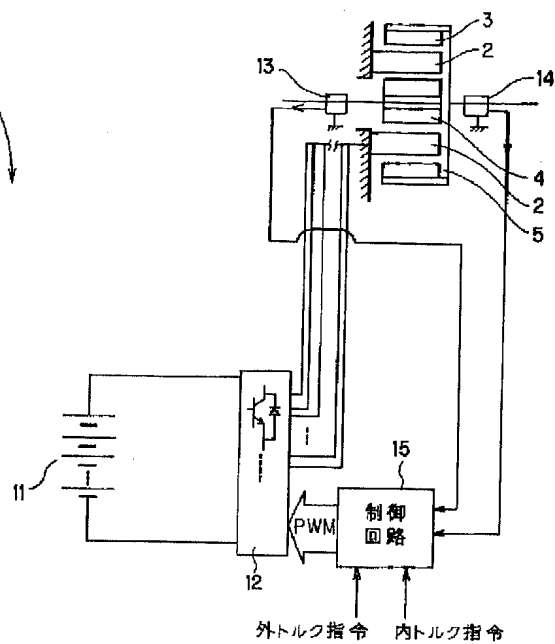


2...ステータ  
3...外側ロータ  
4...内側ロータ  
6...コイル

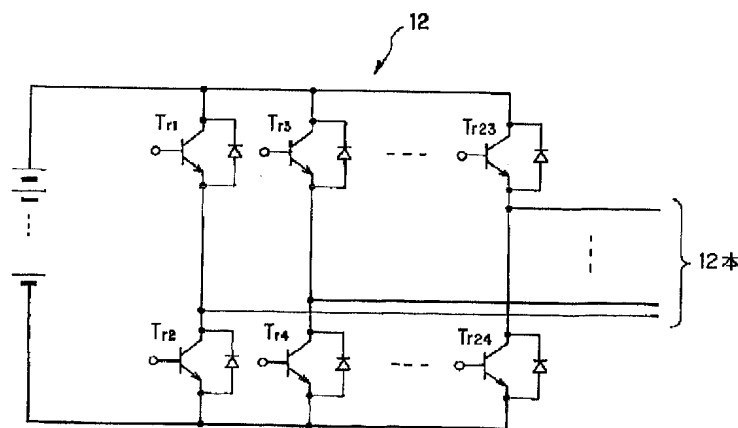
【図2】



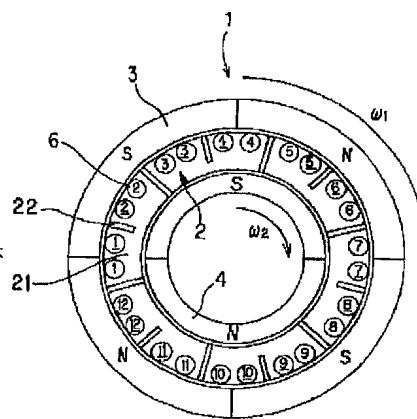
【図3】



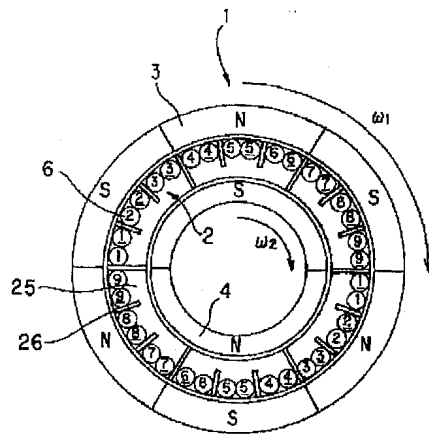
【図4】



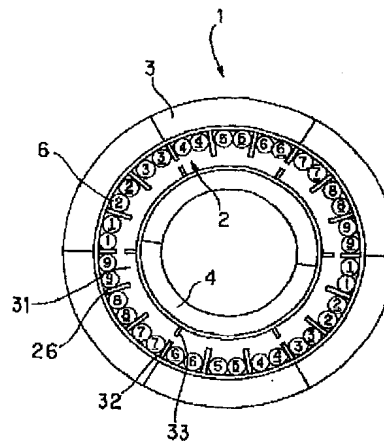
【図5】



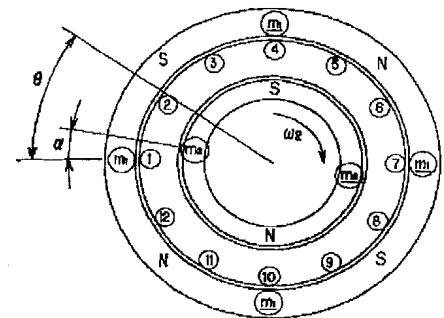
【図 6】



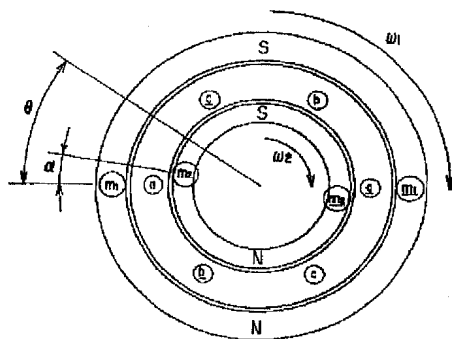
【図 7】



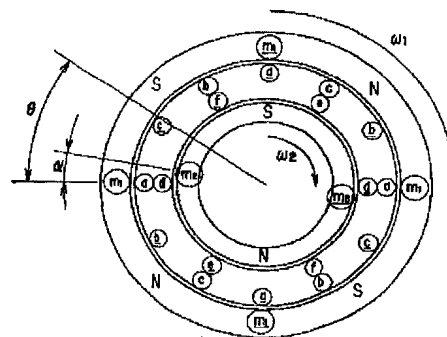
【図 12】



【図 8】



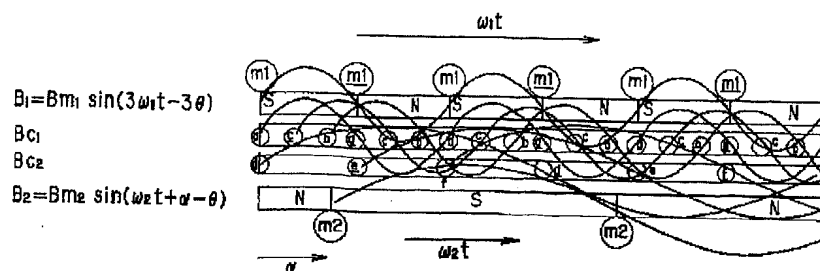
【図 10】



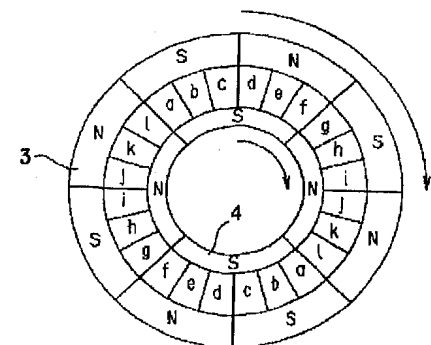
時刻ゼロの位置関係 (外側とコイルの位相があった時刻を0)

時刻ゼロの位置関係 (外側とコイルの位相があった時刻を0)

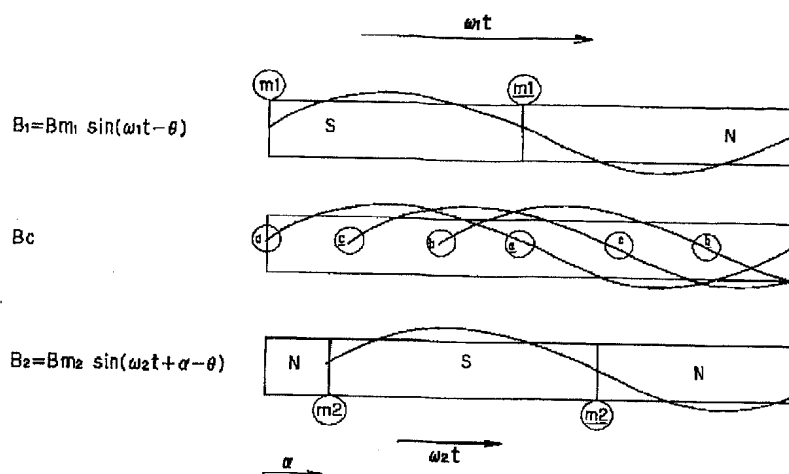
【図 15】



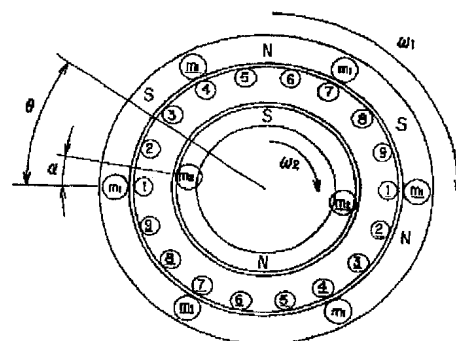
【図 19】



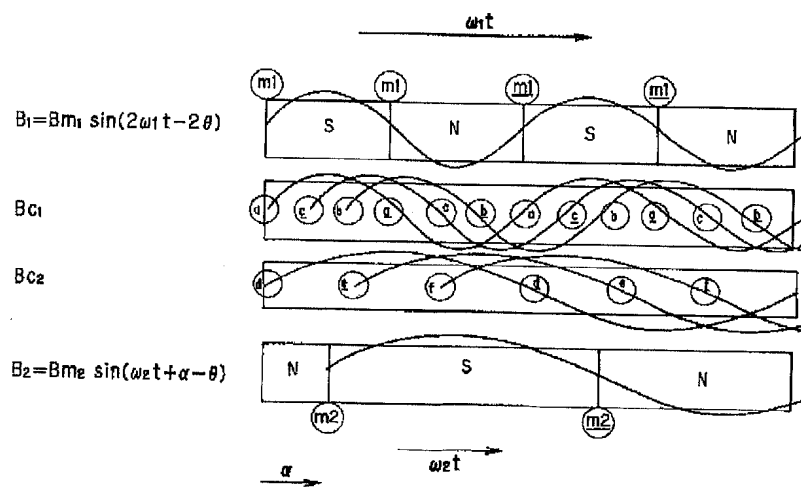
【図 9】



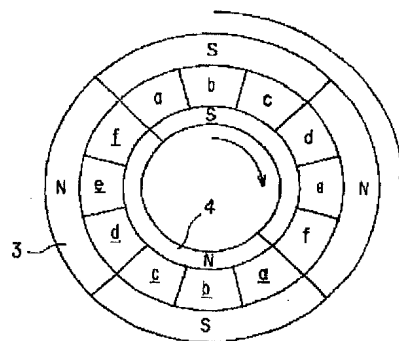
【図 17】



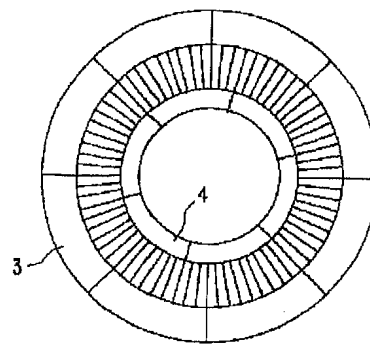
【図 11】



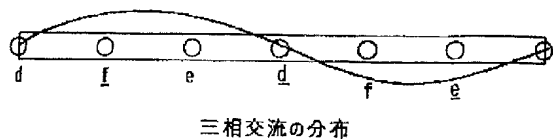
【図 20】



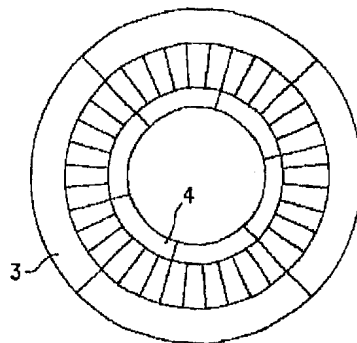
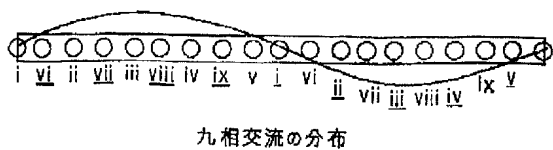
【図 22】



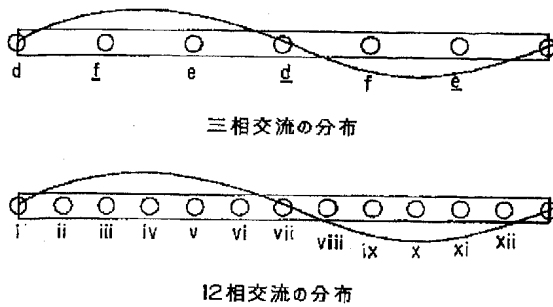
【図 18】



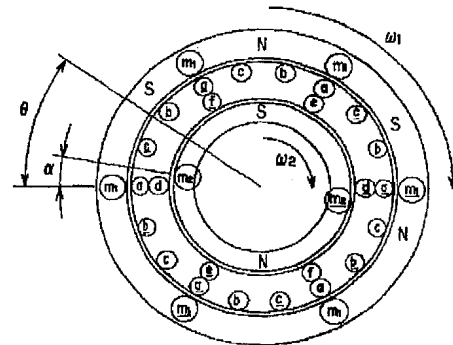
【図 21】



【図13】

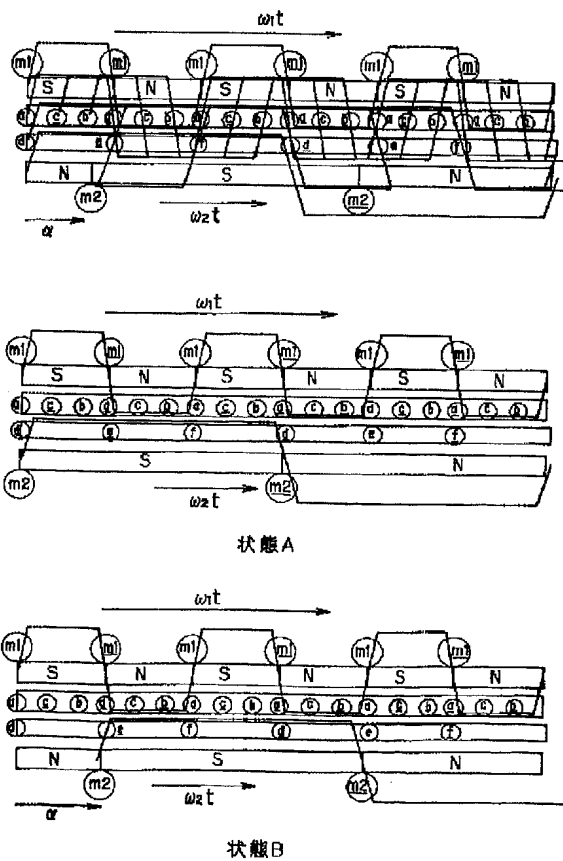


【図14】

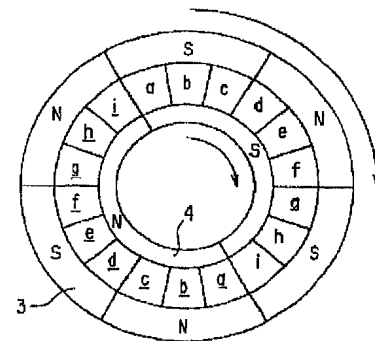


時刻ゼロの位置関係 (外側とコイルの位相があった時刻を0)

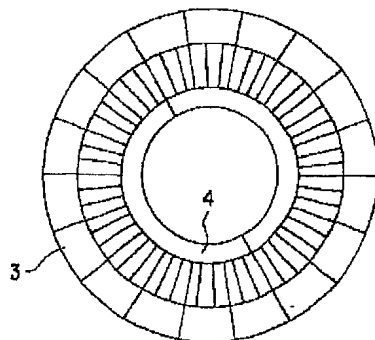
【図16】



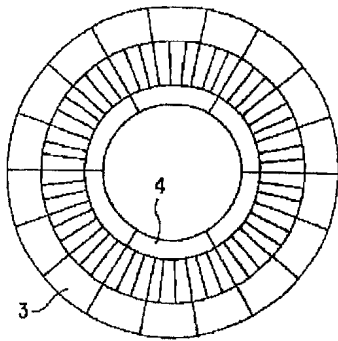
【図23】



【図24】



【図 2 5】



【図 2 6】

